



ulm university universität
uulm

Universität Ulm

D-89069 Ulm

Fakultät für Mathematik und
Wirtschaftswissenschaften



Technische Hochschule Ulm

D-89075 Ulm

Fakultät für Mathematik, Natur-
und Wirtschaftswissenschaften

MASTERARBEIT

Entwicklung und Validierung einer luftgestützten, kamerabasierten Messmethode für den Verschmutzungsgrad von Solarfeldern

Vorgelegt von:

Robin Fonk

834126

robin.fonk@uni-ulm.de

Gutachter:

Dr.-Ing. Ulrich Simon

ulrich.simon@uni-ulm.de

Betreuer vom DLR:

Dr. Fabian Wolfertstetter

fabian.wolfertstetter@dlr.de

Prof. Dr. Stephan Schlüter

stephan.schlueter@thu.de

*externe Masterarbeit im Studiengang Computational Science and Engineering (CSE)
beim*

Institut für Solarforschung
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

4. März 2020

"Entwicklung und Validierung einer luftgestützten, kamerabasierten Messmethode für den Verschmutzungsgrad von Solarfeldern"

- Fassung vom 4. März 2020-

Die vorliegende Masterarbeit wurde in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt - Institut für Solarforschung am Standort Almería erarbeitet.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die durch Ihre Unterstützung zum Gelingen dieser wissenschaftlichen Arbeit beigetragen haben.

Als erstes gilt mein Dank dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt für die Ermöglichung dieser Masterarbeit sowie die tägliche Unterstützung und Betreuung. Ganz besonders möchte ich mich bei meinem externen Betreuer Dr. Fabian Wolfertstetter bedanken. Ebenso gilt der Dank Dr.-Ing. Ulrich Simon und Prof. Dr. Stephan Schlüter für die Betreuung der Masterarbeit.

Darüber hinaus möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken, die mich durch ihre Geduld und Motivation während der Anfertigung dieser Arbeit moralisch unterstützt haben.

Abschließend gilt mein Dank Laura Fonk und Sean Schneeweiß für Anregungen, Tipps und Korrekturen zu meiner Masterarbeit.

Kurzfassung

CSP-Anlagen (Concentrating Solar Power) werden oft in Regionen mit hoher Staubbelastung wie dem Mittleren Osten und Nordafrika gebaut. Aktuelle Verschmutzungsmessverfahren in Solarfeldern sind arbeits- und kostenintensiv und decken selbst bei einer hohen Anzahl von Messpunkten nur einen kleinen Teil der Spiegelflächen ab. Die luftgestützte Messlösung QFly wurde in den letzten Jahren am DLR entwickelt, um die Geometrie und Tracking-Genauigkeit der großen CSP-Spiegelflächen zu messen. Dabei werden mithilfe einer Drohne Bilder eines Solarfeldes gemacht, welche durch ein automatisiertes Programm ausgewertet werden. Verschmutzung von Solarspiegeln ist qualitativ in unverarbeiteten QFly-Messbildern sichtbar. Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine Methode zur automatischen Erfassung der Spiegelreinheit aus Luftbildern, die mit QFly aufgenommen wurden, zu entwickeln. Die Anzahl der Schmutzpartikel pro Spiegeloberfläche entscheiden wie viel Licht bei konstanten Beleuchtungsbedingungen gestreut wird. Ein Teil des gestreuten Lichts wird in die UAV-Kamera einfallen und trägt so dazu bei, dass der Pixel-RGB-Wert, welcher den betreffenden Spiegelbereich darstellt, höhere Werte detektiert als ein Punkt mit weniger Partikeln. Dabei müssen Störfaktoren wie geometrische Einflüsse, Hintergrundspiegelung und diffuses Licht vom RGB-Signal getrennt werden. Bei den jeweiligen Streuuntersuchungen werden die geometrischen Bedingungen zwischen Kamera, Sonne und Spiegel als auch die Partikelgrößenverteilung und das Solarspektrum mit in Betracht gezogen. Die kamerainternen Einstellungen wie Gamma-Korrektur, Weißabgleich und Vignettierung werden untersucht und korrigiert. Es ergibt sich eine vielversprechende Korrelation zwischen den so korrigierten Kamera-RGB-Signalen und den Referenzreflexionsmessungen. Die präsentierten Untersuchungen zeigen, dass eine Verschmutzungsmessmethode mit ausreichender Messunsicherheit per Drohne möglich ist. Die Methode bedarf noch weiterer Entwicklungsarbeit, könnte aber nach deren Abschluss die Verschmutzungsüberwachung in Kraftwerken nachhaltig verändern und verbessern.

Abstract

CSP (Concentrating Solar Power) plants are often built in regions with high dust pollution such as the Middle East and North Africa. Current soiling measurement methods in solar fields are labour- and cost-intensive and cover only a small part of the mirror surfaces even with a high number of measurement points. The airborne measurement solution QFly was developed at DLR in recent years to measure the geometry and tracking accuracy of the large CSP power plant. A drone is used to take pictures of a solar field, which are evaluated by an automated program. Soiling of solar mirrors is qualitatively visible in unprocessed QFly measurement images. The goal of this work is to develop a method for the automatic detection of mirror purity from aerial images taken with QFly. The number of particles per mirror surface determines how much light is scattered under constant lighting conditions. Part of the scattered light will enter the UAV camera and thus contribute to the pixel RGB value, which represents the mirror area, detecting higher values than a point with fewer particles. Disturbing factors such as geometric influences, background reflection and diffuse light must be separated from the RGB signal. The geometrical conditions between camera, sun and mirror as well as the particle size distribution and the solar spectrum considered in the respective scattering investigations. The camera internal settings such as gamma correction, white balance and vignetting are examined and corrected. A promising correlation between the thus corrected camera RGB signals and reference reflectance measurements was found. The presented investigations show that a soiling measurement method with sufficient measurement uncertainty by drone is possible. The method requires further development work and could, once completed, change and improve the soiling monitoring in power plants in the long term.

Veröffentlichungen

Teile dieser Arbeit (Ideen, Abbildungen und Ergebnisse) sind bereits in Veröffentlichungen erschienen:

Wolfertstetter F., Fonk R., Prahl C., Röger M., Wilbert S., Fernández-Reche J. : „**Airborne Soiling Measurements of Entire Solar Fields with QFly**“, SolarPACES, 2019, AIP conference proceedings, zur veröffentlichung eingereicht. Es wird mit der Veröffentlichung im Frühjahr 2020 gerechnet.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xii
Tabellenverzeichnis	xiii
Abkürzungsverzeichnis	xvi
Symbolverzeichnis	xix
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	5
2.1 Verschmutzungserkennung durch Messgeräte	5
2.1.1 Handreflektometer	6
2.1.2 TraCs	6
2.1.3 AVUS	6
2.2 Kamerabasierte Verschmutzungserkennung	7
2.3 Vermessung eines PV- oder CSP-Krafwerks mithilfe einer Drohne . . .	8
3 Theoretische Grundlagen	11
3.1 Grundlegende Definitionen in Bezug auf Partikelstreuung	11
3.1.1 Verschiedene Definitionen für Strahlung	11
3.1.2 Solarstrahlung	12
3.1.3 Definition von Reflektivität und Cleanliness	12
3.1.4 Partikelanzahlgrößenverteilung	14
3.1.5 Solarspektrum	14
3.1.6 Verschiedene Kategorisierung von Partikelstreuung	16
3.2 Mie-Theorie	17
3.2.1 Maxwell Theorie	17
3.2.2 Lösung der Maxwell-Gleichung	19
3.2.3 Lösung der vektoriellen Wellengleichung	20
3.2.4 Darstellung der Mie-Lösung	24
Querschnitt	24
Effizienzfaktor	25
Phasenfunktion	26
3.2.5 Lösung der Maxwell-Gleichung mit Matlab	26
3.3 Kamerabild	30

4 Methoden	31
4.1 Mie-Streuung	32
4.1.1 Streuung an einer Oberfläche (nicht reflektierend)	32
1 Pixel - 1 Partikel	33
1 Pixel - 2 Partikel	34
1 Pixel - N Partikel	35
4.1.2 Streuung auf einer reflektierenden Oberfläche	36
Berechnung des Streuwinkels	36
Kamerawinkel	39
Streueffizienz	42
Integrierung der Partikelgrößenverteilung	44
Integrierung des Solarspektrums	45
4.2 Korrektur des Hintergrunds	48
4.3 Kameraeigenschaften	50
4.3.1 Weißabgleich	51
4.3.2 Gamma Korrektur	52
4.3.3 Vignettierung	55
5 Experiment	57
6 Ergebnisse	61
6.1 Angewandte Korrekturen	61
6.2 Auswertung von Punkten mit Reflektionswert	64
6.3 Auswertung beliebiger Punkte	68
7 Diskussion & Ausblick	75
A Nützliche Identitäten	79
B In der Messkampagne verwendete Rohbilder	81
Literatur	85
Eidesstattliche Erklärung	91

Abbildungsverzeichnis

1.1	Drohnenflug über ein Parabolrinnenspiegel	2
3.1	Reflexion an einem Spiegel	13
3.2	Normierte Partikelgrößenverteilungen für verschiedene Regionen und Witterungsbedingungen.	14
3.3	Normierte Solarspektren für zwei verschiedene atmosphärische Bedingungen.	15
3.4	Verschiedene Kategorien der Partikelstreuung	16
3.5	Definition des sphärischen Koordinatensystems	21
3.6	Der Streuquerschnitt graphisch dargestellt	25
3.7	Streuende Bestrahlungsfunktion	27
3.8	Streuende Bestrahlungsfunktion in einer polaren Darstellung	28
3.9	Die Effizienzfaktoren	29
3.10	Aufbau eines JPEG-Bildes	30
4.1	Einfluss auf den RGB-Wert	32
4.2	Darstellung der Streuung an einem Partikel	33
4.3	Schematische Darstellung der Streuung an zwei Partikeln	34
4.4	Schematische Darstellung der Streuung an einem Bereich, der ein Pixel an der Kamera darstellt.	35
4.5	Berechnung des Streuwinkels aus der nicht reflektierenden Sonne . . .	37
4.6	Berechnung des Streuwinkels aus der reflektierenden Sonne	38
4.7	Definition von α_{sun} und α_{cam}	39
4.8	Die Streuung trifft auf die Linse senkrecht	40
4.9	Kosinus-Korrektur des Kamerawinkels	40
4.10	Bestrahlungsstärke auf das Partikel	43
4.11	Normierte Partikelgrößenverteilung	44
4.12	Normierte Sonnenspektrumsverteilung	46
4.13	Auswahl des HCE-Reflex auf dem Kollektor	48
4.14	Kamera Blockdiagramm	50
4.15	Unterschiedliche Farbtemperaturen bei gleichem Bild	52
4.16	Unterschied zwischen der physikalischen Wahrnehmung einer Kamera und der menschlichen Wahrnehmung eines Auges	53
4.17	Bildaufnahme mit unterschiedlichen Belichtungsfunktionen	54
4.18	Plot der Gammafunktion	55

4.19	Einfluss der Vignettierung	56
5.1	Rohbild der UAV mit gekennzeichnete ROI	57
5.2	Orthobild mit Referenzpunkten	58
6.1	Streuungsfunktion für die Berechnung	62
6.2	Schematische Darstellung der Streukorrektur	63
6.3	Messpunkte im Absorberreflex des Bildes Im118	65
6.4	Korrigierte Messpunkte im Absorberreflex des Bildes Im118	66
6.5	Messpunkte im Absorberreflex unterschiedlicher Bilder	67
6.6	Korrigierte Messpunkte im Absorberreflex unterschiedlicher Bilder	68
6.7	Optischer Vergleich zwischen Bild und RGB-Wert	69
6.8	Messpunktlinie im Absorberreflex unterschiedlicher Bilder	70
6.9	Korrigierte Messpunktlinie im Absorberreflex unterschiedlicher Bilder	72
6.10	Korrigierte Messpunktlinie im Absorberreflex unterschiedlicher Bilder mit verschiedener Partikelgrößenverteilung	73
B.1	Bild Im118 aus dem Experiment	81
B.2	Bild Im209 aus dem Experiment	82
B.3	Bild Im087 aus dem Experiment	82
B.4	Bild Im210 aus dem Experiment	83
B.5	Bild Im172 aus dem Experiment	83
B.6	Bild Im264 aus dem Experiment	84

Tabellenverzeichnis

3.1	Werte für eine Beispielrechnung der Streufunktion	27
6.1	NRMSE der unterschiedlichen Bilder in Bezug auf Im118 - unkorrigiert	71
6.2	NRMSE der unterschiedlichen Bilder in Bezug auf Im118 - unkorrigiert - korrigiert	72
6.3	NRMSE-Werte der unterschiedlichen Bilder in Bezug auf Im118 - verschiedene Partikelgrößenverteilungen	74

Abkürzungsverzeichnis

AM	Luftmasse (<i>engl: air mass</i>)
AOD	optische Aerosoltiefe (<i>engl: aerosol optical depth</i>)
AVUS	Automatisierte Messung von Kontaminationsquoten und -spektren (<i>engl: automated in-situ measurement of contamination quotas and spectrums</i>)
CCD	ladungsgekoppeltes Bauteil (<i>engl: charge-coupled device</i>)
CRS	Zentrales Empfängersystem (<i>engl: central receiver system</i>)
CSP	konzentrierende Solarthermie (<i>engl: concentrating solar power</i>)
DHI	diffuse Bestrahlungsstärke auf eine horizontale Empfangsfläche (<i>engl: diffuse horizontal irradiation</i>)
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DNI	direkte solare Bestrahlungsstärke auf eine senkrecht zur Sonne orientierte Empfangsfläche (<i>engl: direct normal irradiation</i>)
DSP	digitaler Signalprozessor (<i>engl: digital signal processor</i>)
GHI	globale Bestrahlungsstärke auf eine horizontale Empfangsfläche (<i>engl: global horizontal irradiance</i>)
GPS	Globales Positionsbestimmungssystem (<i>engl: global positioning system</i>)
HCE	Absorberrohr (<i>engl: heat collecting element</i>)
LED	Leuchtdiode (<i>engl: light-emitting diode</i>)
NRMSE	Normalisierte mittlere quadratische Abweichung (<i>engl: normalized-root-mean-square error</i>)
PSA	Zentrum zur Erforschung der solaren Energienutzung (<i>span: Plataforma Solar de Almería</i>)
PV	Photovoltaik
QFly	Qualitätsüberprüfung ganzer Solarfelder aus der Luft
RMSE	Mittlere quadratische Abweichung (<i>engl: root-mean-square error</i>)
ROI	Betrachtetes Gebiet in einem Bild (<i>engl: region of interest</i>)
SAM	Sonnen- und Aureolenmessung (<i>engl: sun and aureole measurement</i>)
TARMES	Rinnen-Absorber-Reflexionsmesssystem (<i>engl: trough absorber reflection measurement system</i>)
TraCs	Nachführsensor für Sauberkeit (<i>engl: tracking cleanliness sensor</i>)

UAS	Unbemanntes Flugsystem (<i>engl: unmanned aerial system</i>)
UAV	Unbemanntes Flugzeug - Drohne (<i>engl: unmanned aerial vehicles</i>)

Symbolverzeichnis

Kleinbuchstaben

a	Radius einer Kugel in m
c	Geschwindigkeit im Medium in m/s
c_0	Geschwindigkeit von Licht m/s
f	normierte Verteilungsfunktion des Partikelgrößen
k	Ausbreitungskonstante im Vakuum in 1/m
m	Relativer Brechungsindex zwischen zwei Medien
n	Brechungsindex eines Mediums bei einer Frequenz ω
n_i	Komplexer Anteil des Brechungsindex eines Mediums bei einer Frequenz ω
n_r	Realer Anteil des Brechungsindex eines Mediums bei einer Frequenz ω
n_0	Brechungsindex des Partikels
n_1	Brechungsindex des äußeren Mediums
r	radialer Abstand in m
s	normierte Verteilungsfunktion des Solarspektrums
t	Zeit in s

Großbuchstaben

A_{proj}	Projizierte Fläche eines Raumwinkels in m ²
A_{PxCam}	Fläche eines Pixels auf der Kameralinse in m ²
A_{PxMir}	Fläche auf dem Spiegel, die von einem Kamerapixel gesehen wird in m ²
B	magnetische Flussdichte
C	Querschnitt in m ²
C_{abs}	Absorptionsquerschnitt in m ²
C_{ext}	Extinktionsquerschnitt in m ²
C_{sca}	Streuquerschnitt in m ²
D	elektrische Flussdichte
E	elektrisches Feldstärke

F	dimensionslose Funktion der Streurichtung
H	magnetische Feldstärke
H_n	Besselfunktion dritter Art
I	Bestrahlungsstärke in W/m^2
I_{abs}	absorbierende Bestrahlungsstärke in W/m^2
I_{ext}	extinktierende Bestrahlungsstärke in W/m^2
I_{sca}	streuende Bestrahlungsstärke in W/m^2
I_{trans}	Bestrahlungsstärke mit keiner Partikel Interaktion in W/m^2
I_0	einfallende Bestrahlungsstärke (natürliches Licht) in W/m^2
J	Stromdichte
J_n	Besselfunktion erster Art
L	Strahldichte in $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$
L_{back}	Strahldichte des Hintergrunds (background) in $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$
L_{scat}	gestreuter Anteil des einfallenden Lichts auf ein Partikel über die Phasenfunktion P verteilt in $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$
L_{sun}	gestreuter Anteil des einfallenden Lichts auf ein Partikel in $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$
L_0	einfallende Strahldichte (natürliches Licht) in $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$
N	Anzahl an Partikel
N_n	Besselfunktion zweiter Art
P	Phasenfunktion
P_n^l	Legendre Polynome
Px_{Cam}	Pixel der Kameralinse
Px_{Mir}	Pixel auf der Spiegel, das von einem Kamerapixel gesehen wird
Q	Effizienzfaktor
Q_{abs}	Effizienzfaktor für Absorbtion
Q_{ext}	Effizienzfaktor für Extinktion
Q_{sca}	Effizienzfaktor für Streuung
S	Amplitudenfunktion der Streuung
W_e	Strahlungsenergie in J
Z	Besselfunktion

Griechische Symbole

α_{cam}	Winkel zwischen dem Kameravektor und der Normalen des Spiegels
α_{sun}	Winkel zwischen dem Sonnenvektor und der Normalen des Spiegels

Γ	relativer Bedeckungsgrad
ε	Dielektrizitätskonstante
ε_r	Dielektrizitätskonstante in einem Medium
ε_0	Dielektrizitätskonstante im Vakuum
ζ_n	Riccati-Bessel Funktion
θ	Polarwinkel in einem Kugelkoordinatensystem
λ	Wellenlänge im Vakuum
μ	Permeabilitätszahl
μ_r	Permeabilitätszahl in einem Medium
μ_0	Permeabilitätszahl im Vakuum
ξ	Sauberkeit (cleanliness)
ξ_n	Riccati-Bessel Funktion
ρ	Ladungsdichte
ρ_{mirr}	Reflexionsgrad des Spiegels
σ	Leitfähigkeit
Φ	Strahlungsleistung in Watt
Φ_{abs}	absorbierende Strahlungsleistung in Watt
Φ_{ext}	extinktierende Strahlungsleistung in Watt
Φ_{sca}	streuende Strahlungsleistung in Watt
Φ_{px}	Strahlungsleistung, welche auf ein Kamerapixel auftrifft in Watt
$\Phi_{\text{px}}^{\text{back}}$	Strahlungsleistung, welche durch den Hintergrund auf ein Kamerapixel auftrifft in Watt
$\Phi_{\text{px}}^{\text{diffuse}}$	Strahlungsleistung, welche durch Streuung der diffusen Strahlung auf ein Kamerapixel auftrifft in Watt
$\Phi_{\text{px}}^{\text{scat}}$	Strahlungsleistung, welche durch Streuung auf ein Kamerapixel auftrifft
Φ_0	Strahlungsleistung von einfallenden Licht in Watt
φ	Azimutwinkel in einem Kugelkoordinatensystem
χ_n	Riccati-Bessel Funktion
ψ	Wellenfunktion
Ω	Raumwinkel
Ω_{px}	Raumwinkel eines Pixels
ω	Kreisfrequenz

Einleitung

Im Bereich der erneuerbaren Energien spielt die Solarenergie eine entscheidende Rolle. Sowohl die konzentrierende Solarthermie (engl: concentrating solar power - CSP) als auch die Photovoltaik (PV) leisten dabei einen Beitrag. Der Vorteil eines CSP Kraftwerks ist die Möglichkeit der kurzzeitigen, kostengünstigen und effizienten Speicherung der thermischen Energie. Durch die Speicherung können benötigte Spitzen im Stromverbrauch ausgeglichen werden. Diese Eigenschaft macht CSP zu einer sinnvollen Alternative für alle Länder, die über einen genügend hohen Direktstrahlungsanteil verfügen. Länder wie Marokko, Algerien, die Vereinigten Arabischen Emirate und Spanien sind aus Sicht der Wetterbedingungen optimal für ein CSP Kraftwerk geeignet, jedoch ist die hohe Staubbelastung in diesen Regionen ein nicht zu vernachlässigender Faktor. Partikel wie Mineralstaub, Pollen, Sand und Industriestaub [15] lagern sich mit der Zeit auf den Oberflächen der CSP Spiegel ab. Im Falle von Spiegeloberflächen reduziert die Staubbelastung deren Reflexionsgrad je nach Menge und Art der angelagerten Materie durch Streuung und Absorption von Solarstrahlung. Ein geringer Reflexionsgrad führt zu einer geringeren Strahlung auf das Absorberrohr und damit zu Effizienzeinbußen der gesamten Anlage [18, 51].

Um die Verschmutzung eines Kraftwerks weitestgehend einzudämmen, wird das Solarfeld in regelmäßigen Abständen gereinigt. Die Reinigung wird oft pauschal und ohne Kenntnis der Verschmutzung einzelner Spiegel durchgeführt, weshalb die Reinigung sehr zeitaufwändig und damit sehr kostenintensiv ist [18]. Wenn es die technischen Voraussetzungen zulassen, werden die Parabolspiegel nachts nach unten geneigt, um die Ablagerung von Staub und Sand zu minimieren. Andere Methoden zur Reduktion von Verschmutzung beinhalten hohe Zäune oder Mauern zur Vermeidung von Flugsand innerhalb des Solarfeldes, vor allem in Gebieten von Sandwüsten [8, 55].

Um im Kraftwerksbetrieb einen möglichst hohen Ertrag zu erwirtschaften, sollten die Spiegel immer sauber sein. Die Abwägung zwischen Ertragsverlust und

Reinigungskosten lässt sich mit dem Wissen der Verschmutzung in einem Optimierungsproblem lösen. Damit eine fundierte Entscheidung getroffen werden kann, zu welchem Zeitpunkt ein Spiegel gereinigt werden muss, ist eine großflächige Verschmutzungsmessung von Nöten. Durch diese Quantifizierung (durchschnittlichen Verschmutzungsgrad) der Verschmutzung könnten Kraftwerksbetreiber Reinigungsaktivitäten innerhalb eines Solarfeldes besser planen. Es können zum Beispiel nur partielle Reinigungen einzelner Spiegel vorgenommen werden. Durch die Kenntnis des Verschmutzungsgrads ist zusätzlich eine genauere Prognose der Kraftwerksleistung möglich [48, 57].

Von der Produktentwicklung bis zur Betriebsoptimierung spielt die optische Messtechnik eine wichtige Rolle bei der Qualifizierung von Solarkraftwerken. Das gilt sowohl für CSP- als auch für PV-Kraftwerke. Flächendeckende Verschmutzungsmessungen sind zunehmend gefragt, da immer mehr Kraftwerke in Wüstenregionen mit hoher Staubbelastung geplant und gebaut werden, die durch eine strategische Reinigungsplanung optimiert werden können. Da die Abmessungen von Solarkraftwerken in der Regel in der Größenordnung von wenigen Quadratkilometern liegen, ist es naheliegend, unbemannte Flugdrohnen (engl: unmanned aerial vehicle - UAV) mit optische Messverfahren einzusetzen. Kameras mit intelligenter Bildauswertung und die Vorteile der sich schnell entwickelnden Drohnentechnologie werden zur vollautomatischen Datenerfassung verwendet. Auf diese Weise lässt sich ein gesamtes Solarfeld auf einfachste Weise in relativ kurzer Zeit untersuchen und über die aufgenommenen Bilder automatisch auswerten.



ABBILDUNG 1.1: Das Messsystem QFly bei einer Vermessung eines Parabolrinnenspiegels. Die Drohne ist mit einer Kamera ausgestattet und macht Bilder des Spiegels. Dabei wird besonders auf das Absorberrohr (Receiver) geachtet [10].

Seit 2008 entwickelt das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) das Messsystem QFly zur Vermessung der Spiegelform. Mithilfe von Luftbildern werden Form und Position von Spiegeln und Absorberrohren in Parabolrinnenkraftwerken mit hoher Genauigkeit bestimmt und damit der Bedarf im Solarfeld zur Neuausrichtung einzelner Spiegelfacetten oder Kollektoren identifiziert (siehe Abbildung 1.1). Diese Technik soll auch bei der Erkennung des Verschmutzungsgrades zu Hilfe genommen werden. Die neuartige Messmethode, soll die Verschmutzung automatisch durch die aufgenommenen Bilder der Drohne erkennen und quantifizieren [13, 38].

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein neuartiges Messverfahren vorgestellt werden, welches orts aufgelöste Informationen eines Bildes nutzt, um Aussagen über den Verschmutzungsgrad des gesamten Solarfeldes eines Parabolrinnenkraftwerks abzuleiten. Das Verfahren verwendet ein unbemanntes Luftfahrzeug, um eine hochauflösende Kamera über das Solarfeld zu tragen. Durch die Isolierung des gestreuten Lichts vom Hintergrund, können Aussagen über die Verschmutzung getroffen werden. Wenn das Streuverhalten der Verschmutzungsschicht, die Lichtverhältnisse zum Zeitpunkt der Messung sowie die Positionen von Kamera, Spiegel, Sonne und Absorberrohr (engl: heat collecting element - HCE) bekannt sind, kann aus der berechneten Streuinformation die Sauberkeit des Spiegels abgeleitet werden. Ein Großteil der geometrischen Informationen (z.B. Positionen von Kamera, Spiegel, Sonne und Absorberrohr) kann direkt aus den bestehenden QFly-Algorithmen übernommen werden, die beim DLR [37] verfügbar sind. Das neue Verfahren nutzt zusätzlich Sonnenstands- und Streusimulationen, um die Messgenauigkeit zu erhöhen.

Die vorliegende Arbeit ist in fünf Hauptkapitel sowie in Einleitung und Fazit gegliedert. Zuerst wird der aktuelle Stand der Technik beschrieben. Dabei wird darauf eingegangen wie zum bisherigen Zeitpunkt Verschmutzungsmessungen im Allgemeinen und im Kraftwerk durchgeführt werden. Danach werden die theoretischen Grundlagen der Mie-Streuung und die Kameratechnik erläutert. Als nächstes wird die Methodik beschrieben, wie über eine Bildaufnahme eine Aussage über die Verschmutzung getroffen werden kann. Mehrere Einflussfaktoren wie Streuung, Hintergrund und Kamera spielen dabei eine wichtige Rolle und werden ausführlich erläutert. Die theoretischen Betrachtungen werden mithilfe eines Experiments verglichen und validiert. Letztlich werden die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf sinnvolle zukünftige Arbeiten präsentiert.

Stand der Technik

In diesem Abschnitt sollen aktuelle Methoden der Verschmutzungsmessung in Solarfeldern beschrieben werden. Dabei werden zuerst verschiedene Messgeräte vorgestellt, welche die Reflektivität einer Spiegelfläche messen. Danach werden kamerabasierende Methoden zu Erkennung von Verschmutzung dargestellt. Zum Schluss wird auf die Verwendung von Drohnen im Bereich der Solarenergie eingegangen. Dabei werden kurz die Vor- und Nachteile jeder einzelnen Methode geschildert. Zusätzlich wird auch die QFly Methode, die bereits beim DLR vorhanden ist, erläutert.

2.1 Verschmutzungserkennung durch Messgeräte

Aktuelle Verschmutzungsüberwachungsmethoden in PV-Solarfeldern werden kontinuierlich an einem Set von PV-Panels durchgeführt von denen eine Hälfte täglich gereinigt wird und die andere nicht. Über den Vergleich der beiden Flächen, können Aussagen über die Verschmutzung getroffen werden. Seit wenigen Jahren gibt es neuartige Sensoren zur Integration ins Solarfeld, die die Verschmutzung auf einer kleinen Messfläche ($<100\text{cm}^2$) bestimmen [16, 26].

In einem CSP-Solarfeld werden Verschmutzungsmessungen meist mit einem Handreflektometer durchgeführt. Hierbei findet die Messung direkt auf den CSP-Spiegeln statt, jedoch können nur einzelne Punkte auf ausgewählten Spiegelfacetten gemessen werden [11]. Die Reflektometer-Methode ist sehr teuer, da sie erhebliche Mengen an Arbeitskraft benötigt, um ausreichend Daten für einen repräsentativen durchschnittlichen Reflexionsgrad für das gesamte Solarfeld ermitteln zu können [12, 60]. Vereinzelt werden auch Messgeräte eingesetzt, die neben den eigentlichen Kollektoren aufgestellt werden (TraCs [54], AVUS [22]). Diese Geräte messen jedoch nicht direkt auf den Spiegeln des Solarfeldes, sondern auf einer separat aufgestellten Spiegelprobe.

Ein Problem bei den beschriebenen Methoden ist die im Vergleich zum Solarfeld verschwindend geringe Fläche, die dabei vermessen wird. Der Rückschluss

auf einen Verschmutzungsmittelwert für ganze Felder ist mit hohen Unsicherheiten belegt. Des Weiteren ist das Verschmutzungsverhalten auf der Oberfläche von fest installierten Sensoren nicht notwendigerweise gleich derer auf den Panels. Eine orts aufgelöste Verschmutzungsanalyse ist mit diesen Geräten nicht möglich, da nur einer oder wenige der ortsfesten Sensoren in einem Kraftwerk installiert werden.

2.1.1 Handreflektometer

Ein häufig verwendetes Gerät zur Messung der gerichteten Reflektivität von Solarspiegeln ist das Reflektometer Modell 15R von D&S [45]. Eine Licht emittierende Diode (engl: light emitting diode - LED) mit Apertur kann als punktförmig angenähert werden. Das von der Diode emittierte Licht wird kollimiert und auf einen Strahldurchmesser von 10 mm begrenzt. Nach der Reflexion auf dem Spiegel wird das reflektierte Licht mithilfe einer Sammellinse auf die als Detektor fungierende Photodiode konzentriert [54]. Durch das Verhältnis zwischen dem emittierenden und dem reflektierenden Licht kann eine Aussage über die Sauberkeit des Spiegels getroffen werden [11].

2.1.2 TraCs

Das TraCs (engl: tracking cleanliness sensor) Messgerät befindet sich meist neben dem Solarfeld und misst die Verschmutzung an einer separaten Spiegelprobe. Zusätzlich zu einem darauf installierten Pyrheliometer zur Messung der Direktnormalstrahlung (engl: direct normal irradiation - DNI) wird ein zweites Pyrheliometer angebracht, das die von einer Spiegelprobe reflektierte DNI misst. Diese wird mit der direkt gemessenen DNI verglichen, um die Cleanliness der Spiegelprobe zu ermitteln. Cleanliness bezeichnet dabei die Reflektivität eines verschmutzten Spiegels relativ zu seiner Reflektivität im sauberen Zustand. Daraus wird die Verschmutzungsrate, d.h. die tägliche Abnahme der Cleanliness, bestimmt. Das Gerät zeichnet sich durch niedrige Investitionskosten und geringen zusätzlichen Wartungsaufwand aus. Weitere Vorteile gegenüber bestehenden Messmethoden liegen in der Verwendung des zum Messzeitpunkt vorliegenden Sonnenspektrums, seiner hohen Zeitauflösung und der Vermessung einer vergleichsweise großen Fläche von 30 cm² [54].

2.1.3 AVUS

Das Messgerät AVUS (engl: automated in-situ measurement of contamination quotas and spectrums) ermöglicht die Echtzeitmessung und Überwachung von Sauberkeit und Verschmutzung in definierten Intervallen auf Basis von Reflexionsmessungen. Spiegelproben werden unter einer gegebenen Ausrichtung und Neigung natürlichen Verschmutzungen ausgesetzt. In programmierbaren Intervallen wird der Reflexionsgrad bzw. die Reinheit der Proben gemessen. Dazu werden die Proben auf

einen optischen Port verschoben. Dort durchläuft kollimiertes Licht ein Linsensystem, wird von der verschmutzten Spiegelprobe reflektiert und schließlich von einer Integriereinheit mit einem Si-basierten Sensor erfasst. Vor jeder Messung wird die resultierende Reflexion oder Sauberkeit durch eine Referenzspiegelmessung und eine Temperaturkorrekturroutine kalibriert [22].

2.2 Kamerabasierte Verschmutzungserkennung

Es existieren bereits Veröffentlichungen zum Thema kamerabasierter Verschmutzungserkennung. Für Heliostaten in einem Turmkraftwerk wurde ein kamerabasiertes Verfahren entwickelt, welches die Heliostatreflexion charakterisiert. Die Messmethodik basiert auf einer relativen Flussdichtemessung mit einer CCD-Kamera und einem Reflexionsmessgerät für Referenzanwendungen, hauptsächlich wie das Reflektometer-Gerät von D&S [45]. Die Kamera, die an einer erhöhten Position am Turm des zentralen Empfängersystems (engl: central receiver system - CRS) installiert ist, betrachtet das Heliostatenfeld. Unter einigen der Heliostaten sind nur wenige kleine Referenzreflektorsysteme installiert. Diese Referenzsysteme sind so konzipiert, dass sie, ähnlich wie das AVUS-System, die Messung des Reflexionsgrades in regelmäßigen Abständen automatisch ermöglichen. Das Verfahren verwendet dabei eine beleuchtete lambertsche Fläche auf dem Solarturm, dessen reflektiertes Bild, wie es im Heliostaten von einer Kamera auf dem Turm zu sehen ist, analysiert wird. Aus der Differenz von reflektierten und direkten Bildern des Lambert-Targets wird die Reflexion der Heliostat-Spiegelfacetten abgeleitet [4].

Eine weitere Studie beschreibt ein Verfahren zur Abschätzung des durchschnittlichen Reflexionsvermögens an verschmutzten Spiegelfacetten durch Kombination von Spot-Reflektometer-Messungen mit digitalen Farbfotos unter kontrollierten Lichtverhältnissen. Künstliche Beleuchtung bei Nacht bietet einen hohen Kontrast zwischen sauberen und verschmutzten Spiegelbereichen. Zusätzlich sind die nächtlichen Bedingungen gut für Wartungsarbeiten in großen CSP-Anlagen geeignet, da der normale Arbeitsbetrieb nicht beeinflusst wird. Ein Algorithmus klassifiziert die Spiegelfacettenoberfläche in Bereiche von leichter, mittlerer, starker oder keiner Verschmutzung, basierend auf Punktreflektometer-Messungen an charakteristischen Punkten und der Anzahl der Pixel im Bild, die in diese Kategorien fallen. Der Algorithmus berechnet das durchschnittliche Spiegelreflexionsvermögen als die gewichtete Summe der Pixel, die in verschiedenen Kategorien klassifiziert sind. Die Testergebnisse in dieser Studie zeigen, dass das geschätzte gemittelte Reflexionsvermögen, das durch den Algorithmus bestimmt wird, eine 95 prozentige Übereinstimmung mit einer durchschnittlichen Reflexionsvermögensschätzung zeigt, die mit 480 Spotreflektometerproben durchgeführt wurde. Ein großer Kritikpunkt bei diesem Vorgehen ist, dass die Einteilung der Bilder in die Kategorien händisch vollzogen werden, damit die Referenzverschmutzungswerte am besten wiedergegeben werden. Dadurch sind unterschiedliche Messungen aber nicht miteinander vergleichbar [59].

Eine weitere Publikation stellt eine Methode zur Quantifizierung der Staub- und Verschmutzungsmenge auf PV-Modulen vor, indem fünf verschiedene Bildverarbeitungstechniken untersucht werden. Diese Studie beschäftigt sich mit der Analyse von Farbhistogrammen und statistischen Eigenschaften der aufgenommenen Bilder von PV-Modulen. Eine Bildverarbeitungs-Toolbox wurde unter Verwendung folgender Techniken entwickelt: Binarisierung, Histogrammmodell, statistisches Modell, Bildabgleich und Texturabgleich [58].

In einer weiteren Studie werden unter Laborbedingungen von einer Kamera aufgenommene PV-Modulbilder für verschiedene Staubansammlungen verschiedene Merkmale der Graustufen-Kooperationsmatrix erkannt. Die gewonnenen Daten mit neuen Merkmalen werden auf der Grundlage künstlicher neuronaler Netze klassifiziert, um die Staubbelastung und deren Einfluss auf die Leistung der PV-Module zu bestimmen [50].

Die in Absatz 2.2 aufgeführten Ansätze sind jedoch alle bisher nur unter Laborbedingungen getestet und noch weit von einer großflächigen Anwendung oder Kommerzialisierung entfernt.

2.3 Vermessung eines PV- oder CSP-Krafwerks mithilfe einer Drohne

Die aktuelle experimentelle Forschung ist bestrebt, die Möglichkeit von UAVs oder von unbemannten Flugsystemen (Unmanned Aerial System - UAS) zur Überwachung der Anwendung von Photovoltaikmodulen herauszufinden. Hierbei handelt es sich nicht ausschließlich um die Erkennung von Verschmutzung sondern um die generelle Anwendung von UAV im Bereich PV oder CSP. Zu diesem Zweck werden vermehrt mit Wärmebild- und Sichtkameras ausgestattete UAVs in Solarfeldern eingesetzt und ebenso bei der Inspektion von Photovoltaikmodulen. Bei dem Experiment könnte gezeigt werden, dass die Zusammenarbeit von UAV bei der Überwachung von Photovoltaik-Systemen effektiv war, um Schäden und Defekte an Photovoltaikmodulen zu erkennen, und dass sie im Vergleich zu herkömmlichen Methoden viel zuverlässiger, schneller und kostengünstiger ist [1].

Das DLR verfügt bereits über eine Messtechnik zur Qualifizierung von Parabolrinnenkollektormodulen basierend auf der Fernbeobachtungsmethode namens TARMES (engl: trough absorber reflection measurement system). Anstelle einer stationären Kamera am Boden, die Bilder von einem drehenden Kollektor macht, nutzt der Ansatz QFly eine luftgestützte Kameradrohne, die eine vollständig automatisierte und schnelle Messung einer großen Anzahl von Kollektoren unter realen Betriebsbedingungen macht. QFly liefert durch luftgestützte Bildaufnahmen und die zugehörige Software sowohl Informationen über die geometrischen als auch über die optischen und thermischen Eigenschaften des Solarfeldes. QFly besteht aus drei

komplementären Messverfahren: Das Verfahren „Classic“ basiert auf dem TARMES-Prinzip und ermöglicht die Bestimmung der Spiegelform und der Empfängerposition mit hoher räumlicher Auflösung. „Survey“ liefert ähnliche Ergebnisse aus einer großen Höhe (200 m) mit geringerer Auflösung und zusätzlichen Informationen über die Ausrichtung der Module. „Thermo“ wird verwendet, um Wärmeverluste zu finden - insbesondere Receiver mit Fehlern in der Vakuumisolation. Die Anwendung von QFly-Survey hat gezeigt, dass mit dem aktuellen Entwicklungsstand etwa 60 Kollektorschleifen an einem Tag untersucht werden können. Dabei muss der Betrieb der Anlage nicht unterbrochen werden. Die QFly-Survey gibt Aufschluss über mögliche Fehler der Spiegelform, der Modulausrichtung, der Torsion oder der Spurabweichungen. Basierend auf den Ergebnissen der QFly-Survey können hochauflösende Analysen mit QFly-Classic präzise und effizient zur Untersuchung einzelner Kollektoren eingesetzt werden. Diese präzisen Messungen ergeben die Spiegelform des Konzentrators und damit die Position der Absorberrohre und deren Abweichung von der Fokuslinie. QFly-Thermo wird für ein automatisiertes GPS-bezogenes thermisches Screening der Receiver eingesetzt. Receiver mit Defekten und hohen Wärmeverlusten werden im Solarfeld lokalisiert [36, 37].

Da die Messmethode und die Software für QFly im DLR entwickelt wurde, kann bereits auf umfassendes Wissen und Technologie zurückgegriffen werden. Bei der Aufnahme von Bildern mit der QFly-Drohne kann die 3D-Kollektorgeometrie für Parabolrinnen und Heliostaten im Millimeter Bereich bestimmt werden. Dabei werden die Kollektoren automatisch identifiziert und segmentiert. Nach der Segmentierung wird über verschiedene Algorithmen ein orthographisches Bild des Kollektors erstellt. Zusätzlich zu der Position und der Geometrie des Parabolspiegels werden die Position der Drohne im Raum und damit auch die Blickrichtung der Kamera sowie die Position des Absorberrohres bestimmt. Die gesamten Informationen werden nach dem Flug mithilfe der Software ausgelesen und können für weitere Berechnungen verwendet werden [36, 37]. Um die optimalen Bilder aufzunehmen, wird eine automatische Flugroutenplanung verwendet, bei der zusätzlich die Aufnahmeparameter (Belichtungszeit, Blende, etc.) eingestellt werden können. Somit können Flugrouten geplant werden, in welchen der Winkel zwischen Sonne und Kamera optimal ist. Für fast alle CSP-Projekte wird die Kenntnis des Sonnenstandes vorausgesetzt. Im DLR sind alle hierfür nötigen Algorithmen verfügbar. Die Messung der Solarstrahlung wird am DLR seit vielen Jahren erfolgreich praktiziert. Mit Bildgebung gibt es im DLR einschlägige Erfahrungen aus anderen Entwicklungsprojekten, die die Lichtintensität einer Kamera auswerten, wie z. B. die Wolkenbestimmung oder die Sunshape-Messungen mit SAM (engl: sun and aureole measurement). Zusätzlich hat das DLR sehr viel Erfahrung mit Verschmutzungsmessung. Dabei handelt es sich um fundierte optische Kenntnisse und Messerfahrungen zu Verschmutzung auf CSP-Spiegeln.

Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden theoretische Grundlagen zur Erfassung von Verschmutzung per Kamerabildauswertung verdeutlicht und aufgezeigt. Dabei wird auf grundlegende Definitionen, die Lösung der Mie-Theorie als auch die Beschaffenheit eines Kamerabildes eingegangen.

3.1 Grundlegende Definitionen in Bezug auf Partikelstreuung

In diesem Abschnitt werden bestimmte Begriffe und Definitionen erläutert, die im weiteren Verlauf der Arbeit wichtig sind und häufiger verwendet werden.

3.1.1 Verschiedene Definitionen für Strahlung

Alle Lichtquellen geben eine bestimmte Menge Energie in Form von Strahlung ab. Es gibt verschiedene Definitionen, durch die emittiertes Licht beschrieben werden kann. Alle Definitionen wurden der Quelle [49] entnommen.

1. Der **Strahlungsfluss** Φ (Strahlungsleistung) ist definiert als die Strahlungsenergie W_e pro Zeiteinheit (unabhängig von der Richtung, in der sie abgegeben wird).

$$\Phi = \frac{dW_e}{dt} \quad \left[\frac{\text{W} \cdot \text{s}}{\text{s}} = \text{W} \right] \quad (3.1)$$

2. Die **Bestrahlungsstärke** I ist definiert als der Strahlungsfluss $d\Phi$ auf eine bestimmte Fläche dA .

$$I = \frac{d\Phi}{dA} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (3.2)$$

Das Symbol E ist das empfohlene Symbol für die Bestrahlungsstärke, jedoch kann es zu Verwirrung führen, wenn das Symbol für das elektrische Feld und

die Bestrahlungsstärke oft nebeneinander erscheinen. Aus diesem Grund wird für die weitere Arbeit die Bestrahlungsstärke mit dem Symbol I gekennzeichnet.

3. Die **Strahlungsintensität** I_Ω (Strahlungsstärke, Strahlstärke und Lichtstärke) ist der Anteil der gesamten Strahlungsleistung $d\Phi$, der von einer Lichtquelle in einer gegebenen Raumrichtung in das beliebig kleine Raumwinkelement $d\Omega$ emittiert wird.

$$I_\Omega = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{sr}} \right] \quad (3.3)$$

4. Die **Strahldichte** L ist definiert als der Strahlungsfluss $d^2\Phi$, der durch einen Raumwinkel $d\Omega$ und durch die Fläche dA emittiert wird.

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr}} \right] \quad (3.4)$$

3.1.2 Solarstrahlung

In der Solarstrahlung wird zwischen drei Komponenten unterschieden [56]. Die direkte normalen Bestrahlung (engl: direct normal irradiation - DNI) ist definiert als der Anteil der Sonneneinstrahlung, der senkrecht auf eine ebene Fläche trifft, deren normaler Vektor auf das Zentrum der Sonne zeigt. Nach der Definition [20] ist alles Licht, das zuvor mit der Atmosphäre interagiert, ausgeschlossen. Dies ist in der Praxis jedoch nicht messbar. Die globale horizontale Bestrahlung (engl: global horizontal irradiance - GHI) ist definiert als die Bestrahlungsstärke, die vom gesamten Himmelsbereich auf eine horizontal ausgerichtete Empfangsfläche trifft. Die diffuse horizontale Bestrahlung (engl: diffuse horizontal irradiation - DHI) ist definiert als die Bestrahlungsstärke, die vom Himmel auf eine horizontale Empfangsfläche, mit Ausnahme der DNI, trifft [56]. Jede Form der Solarstrahlung lässt sich aus den jeweils anderen beiden nach Formel

$$\text{GHI} = \text{DHI} + \text{DNI} \cdot \cos(\theta) \quad (3.5)$$

berechnen. In dieser Arbeit wird aber hauptsächlich Bezug auf die DNI genommen, da sie die wichtigste Solarstrahlungskomponente für die CSP-Technologie ist. Die DNI wird durch die Parabolspiegel auf kleine Flächen gebündelt und über das Absorberrohr als Wärme abgeführt.

3.1.3 Definition von Reflektivität und Cleanliness

Licht interagiert mit der Materie, auf die es fällt. Das Licht kann abhängig von der Wellenlänge des Lichts und den Materialeigenschaften, absorbiert, transmittiert oder reflektiert werden. Die Reflektivität ρ_{mirr} ist definiert durch das Verhältnis zwischen dem von einer Fläche reflektierten Strahlungsfluss Φ_r und dem einfallenden

Strahlungsfluss Φ_i [29]. Somit lässt sich die Reflektivität wie folgt beschreiben:

$$\rho_{\text{mirr}} = \frac{\Phi_r}{\Phi_i}. \quad (3.6)$$

Die Abbildung 3.1 zeigt eine Punktquelle in unendlicher Entfernung, deren Strahl unter dem Winkel θ auf das Flächenelement dA des Spiegels trifft. Dort wird der Strahl perfekt gerichtet reflektiert. Das einfallende Licht wird häufig als Bestrahlungsstärke in W/m^2 angegeben, da das Licht wie auch in diesem Fall auf eine Fläche trifft. Durch die Reflexion wird unter realen Bedingungen der Strahl aufgeweitet, insbesondere bei einem verschmutzten Spiegel. Dadurch wird die eingefallene Strahlung auf dA innerhalb eines Raumwinkels $d\Omega$ (siehe Abbildung 3.1) dispergiert. Aus diesem Grund wird nach der Reflexion die Strahlungsdichte in $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$ angegeben. Der Akzeptanzwinkel φ_{acc} ist bei einem Parabolrinnenkollektor definiert als Winkel, wodurch die Strahlung immer noch auf das Absorberrohr trifft und aufgenommen werden kann. Deshalb wird bei CSP die Reflektivität ρ_{mirr} mit der Bestrahlungsstärke innerhalb des Akzeptanzwinkels angegeben.

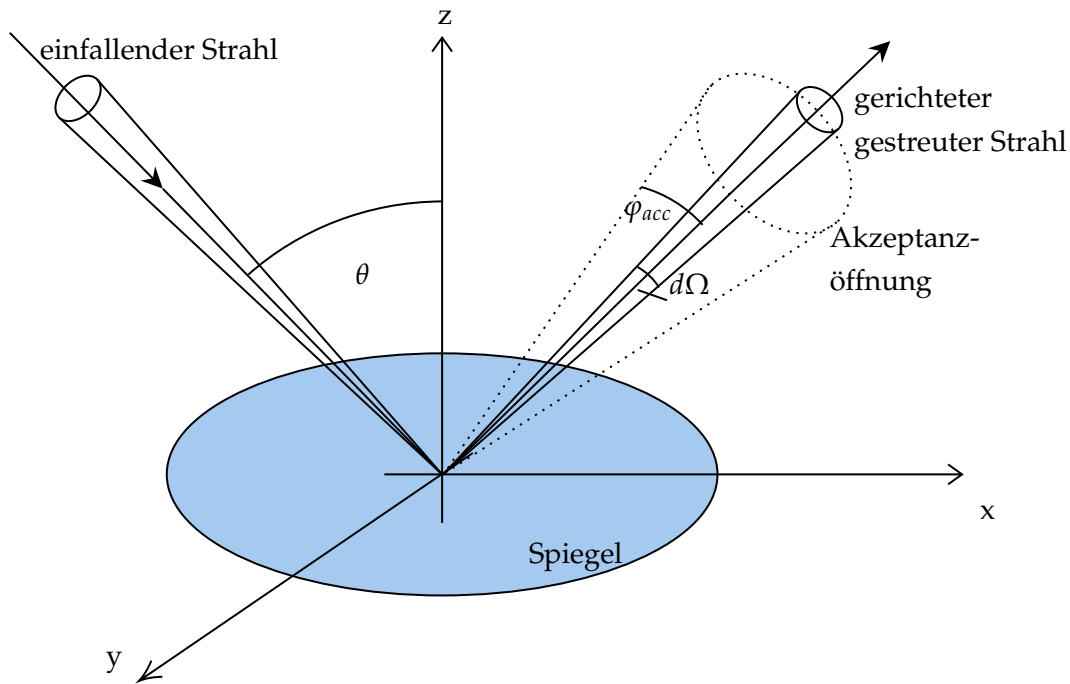


ABBILDUNG 3.1: Ein Strahl trifft unter dem Winkel θ auf das Flächenelement dA des Spiegels und wird innerhalb eines Raumwinkels $d\Omega$ reflektiert. Strahlung, die innerhalb des Akzeptanzwinkels φ_{acc} reflektiert wird, kann noch vom Absorberrohr absorbiert werden. Die Reflektivität ist definiert durch das Verhältnis zwischen dem von einer Fläche reflektierendem Strahlungsfluss Φ_r und dem einfallendem Strahlungsfluss Φ_i [29].

Der Cleanliness-Faktor ξ ist definiert als Verhältnis zwischen der tatsächlichen Reflektivität des Spiegels zu der Reflektivität im sauberen Zustand. Somit lässt sich der Cleanliness-Faktor wie folgt beschreiben:

$$\xi = \frac{\rho_{\text{mirr}}^{\text{soil}}}{\rho_{\text{mirr}}}. \quad (3.7)$$

Der Faktor hängt maßgeblich von der Wellenlänge λ , dem Einfallswinkel θ und dem Akzeptanzwinkel φ_{acc} ab [29].

3.1.4 Partikelanzahlgrößenverteilung

Die Partikelanzahlgrößenverteilung auf einem Spiegel kann je nach Ort und Witterungsbedingung variieren. Die Verteilungen der Abbildung 3.2 werden aus den Quellen [6, 21, 39] entnommen und normalisiert dargestellt. Dabei stammt die Partikelanzahlgrößenverteilung aus New Mexiko (USA), Kuwait und Israel. Es wird deutlich, dass es gravierende Unterschiede in der Größe (Radius) der Partikel gibt. Diese Größenunterschiede müssen bei späteren Berechnungen berücksichtigt werden.

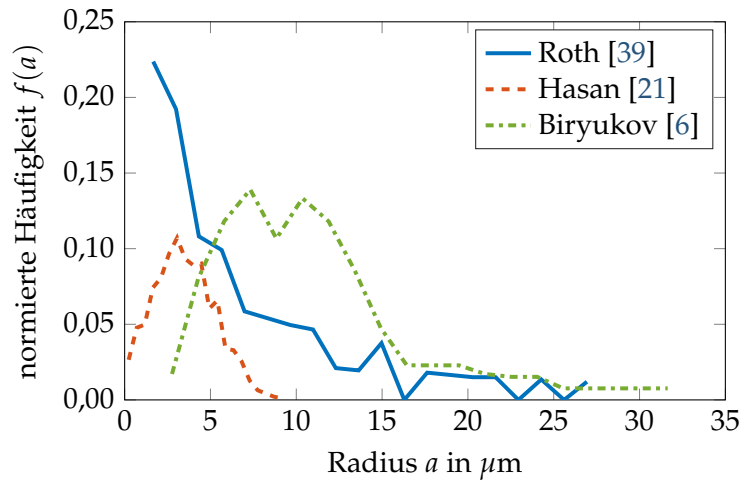


ABBILDUNG 3.2: Die normierten Partikelgrößenverteilungen für verschiedene Regionen und Witterungsbedingungen. Dabei ist die normierte Häufigkeit aufgetragen gegen den Radius a .

3.1.5 Solarspektrum

Die größte Intensität hat das elektromagnetische Spektrum der Sonne im sichtbaren Bereich des Lichts zwischen 300 nm und 900 nm. Die an der Erdoberfläche eintreffende Intensität hängt stark vom Wetter, dem Sonnenstand sowie der atmosphärischen Zusammensetzung ab [31]. Aus diesem Grund werden zwei verschiedene Solarspektren mit der SMARTS-Software [19] in Abhängigkeit der Luftmasse (engl: air mass - AM) und der aerosoloptischen Tiefe (engl: aerosol optical depth - AOD)

berechnet. Die Luftmasse ist in der Astronomie ein relatives Maß für die Länge des Weges, den das Licht eines Himmelskörpers durch die Erdatmosphäre bis zum Erdboden zurücklegt. Dieser Lichtweg beeinflusst die Streuung und Absorption der Strahlung und auch seine spektrale Zusammensetzung. Partikel in der Atmosphäre (Staub, Rauch, Verschmutzung) können das Sonnenlicht durch Absorption oder Streuung von Licht blockieren. Die AOD gibt an wie viel direktes Sonnenlicht durch diese Aerosolpartikel daran gehindert wird, den Boden zu erreichen. Das Standardspektrum wurde für eine Luftmasse von 1,5 und eine aerosoloptische Tiefe von 0,084 berechnet, wie auch in [2] angegeben. Hierbei handelt es sich um optimale Bedingungen mit klarem Himmel und keiner Bewölkung. Die blaue Linie in Abbildung 3.3 soll die normierte Häufigkeit der solaren Strahlungsleistung unter diesen Bedingungen, die auf einen bestimmten Wellenlängenbereich entfällt, darstellen. Dieses Sonnenspektrum wird im Folgenden als Standardspektrum verwendet, wenn nicht anders angegeben. Als Kontrast wird ein zweites Sonnenspektrum mit extremeren Bedingungen gewählt. Mit einer Aerosoltiefe von $AOD = 0,5$ und einer Luftmasse von $AM = 3,0$ werden diffuse atmosphärische Bedingungen beschrieben. Die rote Linie in Abbildung 3.3 soll die normierte Häufigkeit der solaren Strahlungsleistung unter diesen Bedingungen, die auf einen bestimmten Wellenlängenbereich entfällt, darstellen. Es sind in Abbildung 3.3 deutliche Unterschiede der beiden Bedingungen zu erkennen. Bei diffusen atmosphärischen Bedingungen fallen große Wellenlängen deutlich mehr ins Gewicht als bei optimale Bedingungen mit klarem Himmel und keiner Bewölkung.

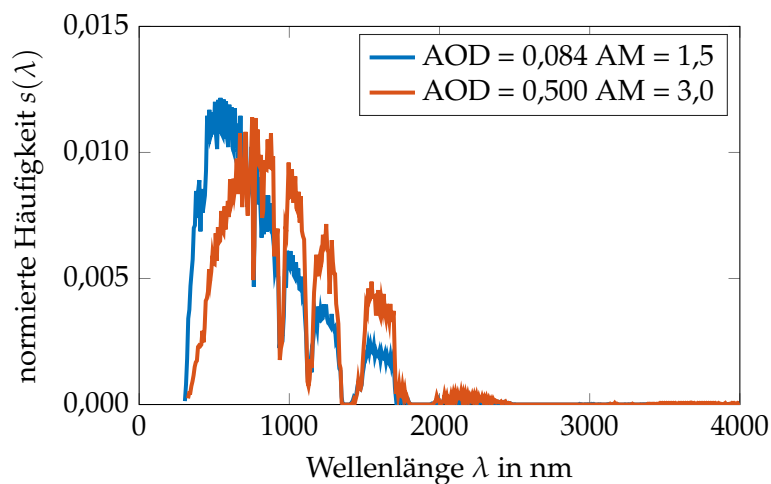


ABBILDUNG 3.3: Die mit der SMARTS-Software berechneten normierten Solarspektren für zwei verschiedene atmosphärische Bedingungen. Dabei ist die normierte Häufigkeit aufgetragen gegen die Wellenlänge λ .

3.1.6 Verschiedene Kategorisierung von Partikelstreuung

Die Streuung eines Teilchens ist stark von der Wellenlänge der anregenden Strahlung abhängig. In Abbildung 3.4 sind die verschiedenen Formen der Streuung schematisch dargestellt. Bei sehr kleinen Partikelgrößen im Vergleich zur Wellenlänge wird eine gleichmäßige Rundstreuung erreicht. Dadurch wird die einfallende Strahlung sehr homogen in alle Richtungen verteilt. In diesem Fall wird die Streuung mit der Rayleigh-Formel berechnet. Ist die Wellenlänge der Strahlung etwa gleich wie die Partikelgröße, wird die Streuung über die Mie-Theorie berechnet. Je größer das Partikel ist, desto mehr wird die Streuung in Vorwärtsrichtung konzentriert. Kleinere Teile werden ebenfalls reflektiert und zurückgestreut [5].

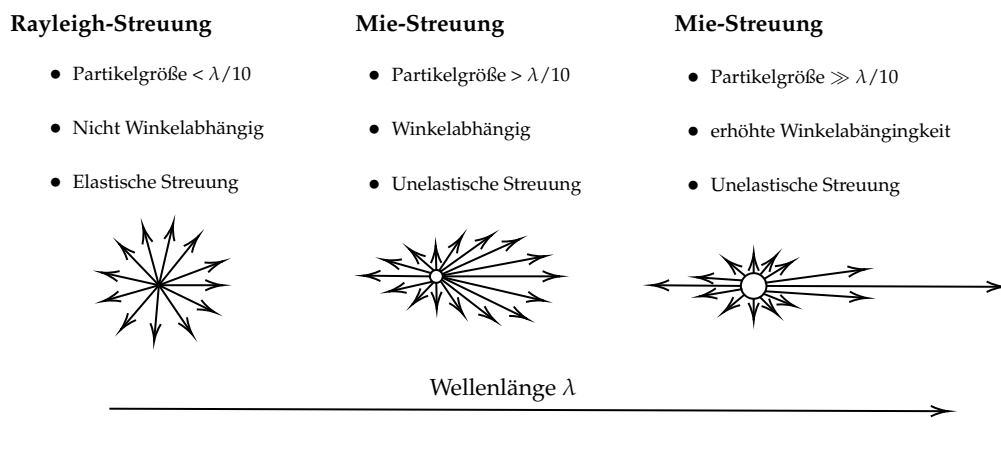


ABBILDUNG 3.4: Die Streuung eines Teilchens ist stark abhängig von der Wellenlänge λ der Strahlung. Ist die Partikelgröße sehr klein, ist die Streuung gleichmäßig rund. In diesem Fall wird die Streuung mit der Rayleigh-Formel berechnet. Wenn die Wellenlänge λ der Strahlung die gleiche Größe wie das Partikel hat, wird Mie-Streuung verwendet [5].

3.2 Mie-Theorie

In diesem Kapitel werden grundlegende Konzepte für die theoretische Beschreibung der Lichtausbreitung entwickelt. Die in dieser Arbeit durchgeführten Beobachtungen der Wechselwirkungen zwischen Licht und Materie werden durch die klassische Elektrodynamik auf der Grundlage der Maxwell-Gleichungen beschrieben. Im Prinzip lassen sich zwei Arten von Licht-Materie-Wechselwirkungen unterscheiden: die Lichtstreuung und die Lichtabsorption. Bei der Lichtstreuung bewirkt eine Welle, die auf ein Molekül trifft, ein Dipolmoment, woraufhin das Molekül eine Sekundärwelle aussendet. Die Überlagerung aller Sekundärwellen des Moleküls eines Mediums bildet dann das Streufeld. Es gibt zwei verschiedene Streumechanismen. Bei der elastischen Streuung hat die Sekundärwelle die gleiche Energie wie die Eingangswelle, während sich bei der inelastischen Streuung die Frequenz der Sekundärwelle ändert (z.B. Raman-Streuung, Brillouin-Streuung). Elastische Streuung ist der dominante Prozess in der Natur und wird in dieser Arbeit behandelt. Die aus der Optik bekannten Phänomene wie Brechung, Reflexion oder Beugung lassen sich auch auf die Lichtstreuung zurückführen und durch Überlagerung von Streuprozessen an Grenzflächen oder Aperturen darstellen. Die zweite Interaktion ist die Lichtabsorption. Das Molekül nimmt Energie aus der einfallenden Welle auf und wandelt sie in andere Formen um, z.B. thermische Energie [15, 25].

3.2.1 Maxwell Theorie

Dieser Abschnitt beschreibt die Ausbreitung und Streuung von Licht mithilfe der klassischen Maxwell-Gleichungen. Die Herleitung und Lösungen der Maxwell-Gleichungen sind aus [7, 14, 24] entnommen und zusammengefasst. Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen wird durch das Ampere-Maxwell-Gesetz mit der Gleichung 3.8 und dem Faradaysche Gesetz mit der Gleichung 3.9 beschrieben. Die Ausgangsbedingungen sind gegeben durch das Gaußsche Gesetz für elektrische Felder mit der Gleichung 3.10 und durch das Gaußsche Gesetz für Magnetfelder mit der Gleichung 3.11. Die Bedeutung der verschiedenen Operatoren kann auch dem Anhang A entnommen werden.

Ampere-Maxwell Gesetz

Ein zirkulierendes Magnetfeld wird durch einen elektrischen Strom und durch ein elektrisches Feld erzeugt, das sich mit der Zeit ändert.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{d\mathbf{D}}{dt} + \mathbf{J} \quad (3.8)$$

Die Bedeutung der einzelnen Symbole wird wie folgt zugeordnet: t = Zeit, \mathbf{H} = Magnetfeld, \mathbf{D} = elektrische Flussdichte, \mathbf{J} = Stromdichte.

Faraday's Gesetz

Ein zirkulierendes elektrisches Feld wird durch ein Magnetfeld erzeugt, das sich mit der Zeit ändert.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{d\mathbf{B}}{dt} \quad (3.9)$$

Die Bedeutung der einzelnen Symbole wird wie folgt zugeordnet: t = Zeit, \mathbf{B} = magnetische Induktionskraft, \mathbf{E} = elektrisches Feld.

Gaußsches Gesetz des elektrischen Feldes

Das durch die elektrische Ladung erzeugte elektrische Feld weicht von der positiven Ladung ab und konvergiert bei negativer Ladung.

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (3.10)$$

Die Bedeutung der einzelnen Symbole wird wie folgt zugeordnet: \mathbf{D} = elektrische Verschiebung, ρ = Dichte der Ladung.

Gaußsches Gesetz des magnetischen Feldes

Die Divergenz des Magnetfeldes an jedem Punkt ist Null.

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.11)$$

Die Bedeutung des Symbols wird wie folgt zugeordnet: \mathbf{B} = magnetische Induktion

Die konstitutiven Beziehungen werden verwendet, um den Zusammenhang zwischen den elektrischen und magnetischen Flussdichten, \mathbf{D} , \mathbf{B} , den Feldstärken, \mathbf{E} , \mathbf{H} und der Stromdichte \mathbf{J} herzustellen. Für die meisten der in dieser Arbeit betrachteten Probleme werden lineare, isotrope und absorbierende (verlustbehaftete) Medien angenommen, für die die folgenden konstitutiven Beziehungen gelten:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \mathbf{E}, \quad (3.12)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H}, \quad (3.13)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}. \quad (3.14)$$

Die Lichtausbreitungs- und Absorptionseigenschaften eines homogenen Mediums werden durch die Permittivität ε_r , durch die Konduktivität σ und durch die Permeabilität eines Mediums μ_r beschrieben. Diese Parameter sind in der Regel abhängig von der Wellenlänge. Die Streuung erfolgt bei Dichteschwankungen, z.B. bei Inhomogenitäten innerhalb eines Mediums oder an Grenzflächen zwischen verschiedenen Medien. Lichtwellen, die sich in absorbierenden Medien ausbreiten, werden

schwächer und verlieren beim Durchtritt Energie. Die Permittivität und Konduktivität eines Mediums kann durch den aus der Optik bekannten komplexen Brechungsindex $n = n_r + in_i$ und die Kreisfrequenz ω wie in Gleichung 3.15 und 3.16 dargestellt werden.

$$\varepsilon_r = n_r^2 + n_i^2 \quad (3.15)$$

$$\sigma = -2n_r n_i \omega \varepsilon_0 \quad (3.16)$$

3.2.2 Lösung der Maxwell-Gleichung

Die Maxwell-Gleichungen bilden ein System von acht gekoppelten partiellen Differentialgleichungen erster Ordnung. Sie stellen ein Anfangswertproblem dar, das in der Standardform z.B. mithilfe numerischer Methoden gelöst werden kann. Es kann gezeigt werden, dass die Lösungen für Felder an Orten kontinuierlicher Materialparameterverläufe von zwei Vektordifferentialgleichungen zweiter Ordnung (Vektorwellengleichungen) ausreichend sind:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0, \quad (3.17)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0. \quad (3.18)$$

Eine allgemeine Lösung der Vektorwellengleichungen 3.17 und 3.18 sind Wellen der Gleichung:

$$\mathbf{E}(x, t) = \mathbf{E}_0 e^{i(kx - \omega t)}, \quad (3.19)$$

$$\mathbf{H}(x, t) = \mathbf{H}_0 e^{i(kx - \omega t)}. \quad (3.20)$$

Die Wellen breiten sich mit der Geschwindigkeit $c = \frac{c_0}{n}$ aus. Die Amplituden \mathbf{E}_0 und \mathbf{H}_0 sind konstante Vektoren. Die Verbindung zwischen dem Wellenvektor k und der Kreisfrequenz ω ist durch

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.21)$$

gegeben. Die Randbedingungen zwischen den Medien m_1 und m_2 werden durch den Normalenvektor n_n definiert:

$$(\mathbf{E}_{m_2} - \mathbf{E}_{m_1}) \times n_n = 0, \quad (3.22)$$

$$(\mathbf{H}_{m_2} - \mathbf{H}_{m_1}) \times n_n = 0. \quad (3.23)$$

Die Vektorwellengleichungen (3.17, 3.18) und die Randbedingungen (3.22, 3.23) bilden ein Grenzwertproblem. Aufgrund der Linearität der Maxwell-Gleichungen gilt

das Überlagerungsprinzip. Spezielle Lösungen können als Überlagerung von Wellen der Form 3.19 und 3.20 dargestellt werden. Der Poynting-Vektor

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (3.24)$$

legt die Größe und Richtung der Übertragungsrate der elektromagnetischen Energie an allen Punkten des Raums fest. Er ist von grundlegender Bedeutung für Probleme der Ausbreitung, Absorption und Streuung elektromagnetischer Wellen, da der Betrag die Intensität der elektromagnetischen Welle markiert.

3.2.3 Lösung der vektoriellen Wellengleichung

Die Lösung der Streuung einer ebenen elektromagnetischen Welle auf eine dielektrische oder metallische Kugel wird allgemein als Mie-Theorie bezeichnet. Wichtige Parameter zur Beschreibung des Streuproblems ist die Beziehung zwischen Partikelgröße und Wellenlänge, die durch den Größenparameter $x = k/a$, mit dem Kugelradius a und der Wellenzahl im äußeren Medium k definiert ist. Ein zusätzlich wichtiger Faktor ist der relative Brechungsindex $m = n_1/n_0$, der den Brechungsindex der Kugel n_1 (komplex für absorbierende Partikel) mit dem Brechungsindex des äußeren Mediums n_0 (keine Absorption, real) in Verbindung bringt. Das Zentrum der Kugel befindet sich im Ursprung der Koordinaten und die Bestrahlung erfolgt in Richtung der positiven z-Achse. Für dieses Problem ist die Skalarwellengleichung als folgende Gleichung definiert:

$$\nabla^2 \psi + k^2 m^2 \psi = 0. \quad (3.25)$$

Um weitere Berechnungen zu erleichtern, wird die ideale Skalarwellengleichung in sphärische Koordinaten umgewandelt. Der Winkel θ , φ und der Radius a ist wie in der Abbildung 3.5 dargestellt definiert.

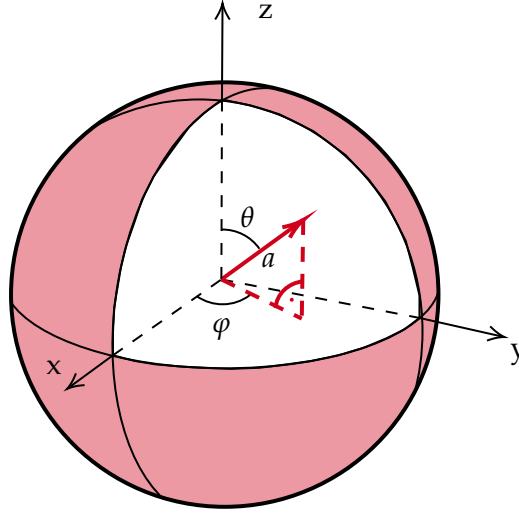


ABBILDUNG 3.5: Das sphärische Koordinatensystem dient zur Berechnung der Lichtstreuung. θ definiert den Polarwinkel und φ den Azimutwinkel in einem sphärischen Koordinatensystem. Der Parameter a definiert den Radius des Partikels [28].

Durch das umwandeln der Skalarwellengleichung 3.25 in ein sphärischen Koordinatensystem, entsteht folgende Gleichung:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2(\theta)} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi^2} + k^2 \psi = 0. \quad (3.26)$$

Die elementare Lösung der Skalarwellengleichung im sphärischen Koordinatensystem besteht aus folgenden Typ:

$$\psi_{ln}^1 = \cos(l\varphi) P_n^l(\cos(\theta)) Z_n(mkr), \quad (3.27)$$

$$\psi_{ln}^2 = \sin(l\varphi) P_n^l(\cos(\theta)) Z_n(mkr). \quad (3.28)$$

Die Gleichungen 3.27 und 3.28 setzen sich zusammen aus den Lösungen der Bessel-Differentialgleichung (Besselfunktion) Z_n und den Legendre-Polynomen P_n^l , mit $l \in \{0, 1, \dots\}$ und $n \in \{l, l+1, \dots\}$. In zylindrischen oder kugelförmigen Koordinatensystemen kann eine Lösung der Maxwell-Gleichungen über vektorharmonische Funktionen vorteilhaft sein [7]. Dabei wird die Lösung der Vektorwellengleichungen 3.17 und 3.18 auf die Lösung einer skalaren Differentialgleichung zweiter Ordnung übertragen. Wenn ψ die Skalarwellengleichung erfüllt, werden die Vektoren \mathbf{M}_ψ und \mathbf{N}_ψ definiert durch

$$\mathbf{M}_\psi = \nabla \times (r\psi), \quad (3.29)$$

$$mk\mathbf{N}_\psi = \nabla \times \mathbf{M}_\psi. \quad (3.30)$$

Die Gleichungen 3.29 und 3.30 erfüllen die Vektorwellengleichungen (3.17, 3.18) und sind darüber hinaus durch folgende Gleichung verknüpft:

$$mk\mathbf{M}_\psi = \nabla \times \mathbf{N}_\psi. \quad (3.31)$$

Sei u und v zwei Lösungen der Skalarwellengleichung 3.26 und $\mathbf{M}_u, \mathbf{N}_u, \mathbf{M}_v, \mathbf{N}_v$ die abgeleiteten Vektorfelder. Es lässt sich zeigen, dass durch eine einfache Substitution die Maxwell-Gleichungen 3.17 und 3.18 erfüllt sind durch

$$\mathbf{E} = \mathbf{M}_v + i\mathbf{N}_u, \quad (3.32)$$

$$\mathbf{H} = m(-\mathbf{M}_u + i\mathbf{N}_v). \quad (3.33)$$

Es kann nachgewiesen werden, dass durch die Wahl von u und v durch die Funktionen 3.34 und 3.35 und unter Berücksichtigung der Randbedingungen an der Kugeloberfläche Lösungen der Feldgleichungen für Quelle, Streuung und Innenfeld nach sphärischen vektorharmonischen Funktionen entwickelt werden können.

$$u(\varphi, \theta) = -\frac{i}{kr} e^{-ikr+i\omega t} \cos(\varphi) \sum_{n=1}^{\infty} -a_n (-i)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} P_n^l(\cos(\theta)) \quad (3.34)$$

$$v(\varphi, \theta) = -\frac{i}{kr} e^{-ikr+i\omega t} \sin(\varphi) \sum_{n=1}^{\infty} -b_n (-i)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} P_n^l(\cos(\theta)) \quad (3.35)$$

Die Faktoren a_n und b_n der Funktionen 3.34 und 3.35 lassen sich aus den Randbedingungen wie folgt berechnen:

$$a_n = \frac{\zeta_n'(y)\zeta_n(x) - m\zeta_n(y)\zeta_n'(x)}{\zeta_n'(y)\xi_n(x) - m\zeta_n(y)\xi_n'(x)}, \quad (3.36)$$

$$b_n = \frac{m\zeta_n'(y)\zeta_n(x) - \zeta_n(y)\zeta_n'(x)}{m\zeta_n'(y)\xi_n(x) - \zeta_n(y)\xi_n'(x)}. \quad (3.37)$$

Dabei werden x und y mit folgenden Parametern berechnet:

$$x = ka = \frac{2\pi a}{\lambda} \quad \text{und} \quad y = mka.$$

Mit den Bessel-Funktionen der ersten, zweiten und dritten Art, $J_n(z)$, $N_n(z)$, $H_n^{(1)}(z)$ lassen sich die Riccati-Bessel-Funktionen $\zeta_n(z)$, $\chi_n(z)$ und $\xi_n(z)$ berechnen, welche ebenfalls für die Berechnung der Faktoren a_n und b_n benötigt werden:

$$\zeta_n(z) = \sqrt{\frac{\pi z}{2}} J_{n+1/2}(z), \quad (3.38)$$

$$\chi_n(z) = \sqrt{\frac{\pi z}{2}} N_{n+1/2}(z), \quad (3.39)$$

$$\xi_n(z) = \sqrt{\frac{\pi z}{2}} H_{n+1/2}^1(z). \quad (3.40)$$

Zusätzlich können einige Teile der Gleichung 3.34 und 3.35 durch die Werte von π_n und τ_n wie folgt ersetzt werden:

$$\pi_n(\cos(\theta)) = \frac{1}{\sin(\theta)} P_n^l(\cos(\theta)), \quad (3.41)$$

$$\tau_n(\cos(\theta)) = \frac{d}{d\theta} P_n^l(\cos(\theta)). \quad (3.42)$$

Die daraus resultierenden Feldkomponenten können als folgende Formel zusammengefasst werden:

$$E_\theta = H_\varphi = -\frac{i}{kr} e^{-ikr+i\omega t} \cos(\varphi) S_2(\theta), \quad (3.43)$$

$$-E_\varphi = H_\theta = -\frac{i}{kr} e^{-ikr+i\omega t} \sin(\varphi) S_1(\theta), \quad (3.44)$$

wobei S_1 und S_2 definiert sind als

$$S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \{a_n \pi_n \cos(\theta) + b_n \tau_n \cos(\theta)\}, \quad (3.45)$$

$$S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \{b_n \pi_n \cos(\theta) + a_n \tau_n \cos(\theta)\}. \quad (3.46)$$

Der Poynting-Vektor S wird häufig auch als Amplitudenfunktion bezeichnet und definiert die Größe und die Richtung der Ausbreitung in allen Punkten des Raumes. S kann deshalb auch als Verteilungsfunktion des Streulichts betrachtet werden. Über die Amplitudenfunktion können Rückschlüsse über die gestreute Intensität gewonnen werden. Unter der Intensität I wird der Energiefluss pro Flächeneinheit verstanden. In der Optik nennt man dies die Bestrahlungsstärke. Die einfallende Welle und die gestreute Welle an jedem Punkt des Fernfeldes sind unidirektional, d.h. jeweils auf eine Richtung oder auf einen sehr kleinen Raumwinkel um diese Richtung beschränkt. Die Intensität der elektromagnetischen Welle ist proportional zum Quadrat der Amplitude und wird wie folgt berechnet:

$$i_1 = |S_1(\theta)|^2 \quad \text{und} \quad i_2 = |S_2(\theta)|^2. \quad (3.47)$$

Es sei nun I_0 die Intensität des einfallenden Lichts, I die Intensität des gestreuten Lichts an einem Punkt mit dem Abstand r zum Partikel und k die Wellenzahl ($k = 2\pi/\lambda$) mit λ als Wellenlänge im umgebenden Medium. Da I proportional zu I_0 und $1/r^2$ sein muss ergibt sich für Licht unterschiedlicher Polarisation verschiedene Intensitäten:

Senkrechte Polarisation:

$$I = \frac{i_1}{k^2 r^2} I_0 \quad (3.48)$$

Parallele Polarisierung:

$$I = \frac{i_2}{k^2 r^2} I_0 \quad (3.49)$$

Einfallendes natürliches Licht (unpolarisiert):

$$I = \frac{\frac{1}{2}(i_1 + i_2)}{k^2 r^2} I_0 \quad (3.50)$$

Elektromagnetische Wellen, die sich im Raum ausbreiten, haben unterschiedliche Schwingungsrichtungen. Lichtwellen, die nur in einer Ebene schwingen, werden als polarisiert bezeichnet. Da in dieser Arbeit die Streuung von natürlichem Sonnenlicht betrachtet wird, kann die Intensität mit der Formel 3.50 für unpolarisiertes Licht bestimmt werden.

3.2.4 Darstellung der Mie-Lösung

Die Intensität und damit die Verteilungsfunktion des Streulichts kann in verschiedenen Einheiten oder als Phasenfunktion ausgegeben werden. Wichtig für die Berechnung sind dabei der Streuquerschnitt und der Streueffizienzfaktor.

Querschnitt

Um zu bestimmen, welcher Anteil des einfallenden Lichts gestreut bzw. absorbiert wird, wird der Querschnitt C berechnet. Für die Definition des Querschnitts wird die Funktion $F(\theta, \varphi)$ benötigt. Sei $F(\theta, \varphi)$ eine dimensionslose Funktion der Richtung in Abhängigkeit des Polarisationszustand der einfallenden Welle.

$$F(\theta, \varphi) = i_1 = |S_1(\theta)|^2 \quad \text{senkrechte Polarisierung}$$

$$F(\theta, \varphi) = i_2 = |S_2(\theta)|^2 \quad \text{parallele Polarisierung}$$

$$F(\theta, \varphi) = \frac{1}{2}(i_1 + i_2) = \frac{1}{2}(|S_1(\theta)|^2 + |S_2(\theta)|^2) \quad \text{einfallendes natürliches Licht}$$

Die in alle Richtungen gestreute Gesamtenergie soll gleich der Energie der einfallenden Welle sein, die auf die Fläche C_{sca} fällt. Nach dieser Definition würde C_{sca} berechnet werden als

$$C_{sca} = \frac{1}{k^2} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi. \quad (3.51)$$

Die vom Partikel absorbierte Gesamtenergie entspricht der Energie der einfallenden Welle, die auf die Fläche C_{abs} fällt, und die vom ursprünglichen Strahl entfernte Energie kann per Definition gleich der Energie des einfallenden Lichts, das auf die Fläche C_{ext} fällt, gesetzt werden. Der Energieerhaltungssatz erfordert dann, dass

$$C_{ext} = C_{sca} + C_{abs}. \quad (3.52)$$

C_{ext} , C_{sca} und C_{abs} werden als der Querschnitt des Teilchens aus Extinktion, Streuung und Absorption bezeichnet. Die Wirkungsquerschnitte haben eine Dimension der Fläche. In Abbildung 3.6 ist der Streuquerschnitt grafisch dargestellt.

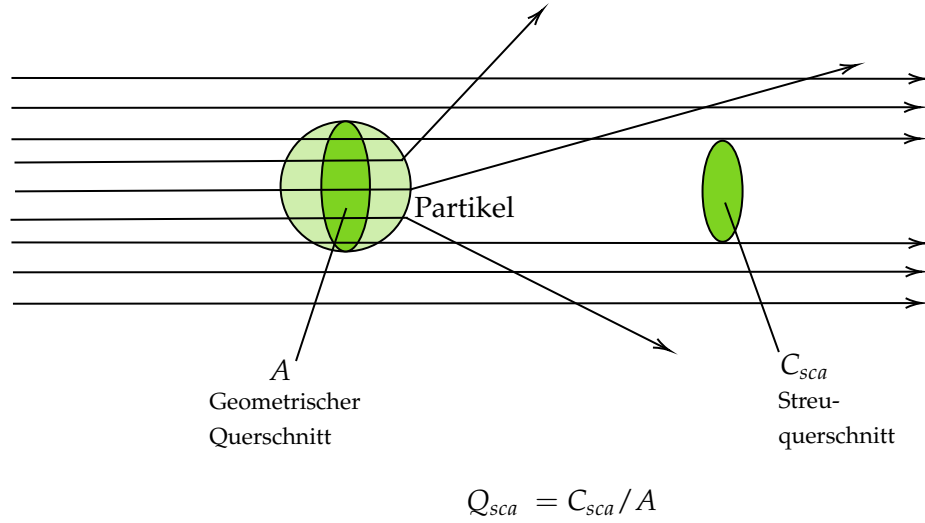


ABBILDUNG 3.6: C_{sca} entspricht einer Fläche, die den Anteil der Streuung im Vergleich zur ursprünglichen Strahlung darstellt [46].

Die Strahlung trifft auf das Partikel mit einem geometrischen Querschnitt A . Dabei wird ein Teil der Strahlung, die auf das Partikel trifft gestreut. Der Anteil an der gestreuten Strahlung wird durch den Streuquerschnitt C_{sca} dargestellt. Diese Fläche spiegelt die gesamte Energie wieder, die gestreut wird, falls das einfallende Licht direkt auf die Fläche C_{sca} fällt.

Effizienzfaktor

Oftmals wird ein dimensionsloser Faktor benötigt, der den Anteil der Streuung darstellt. Aus diesem Grund wird der Querschnittswert C durch den geometrischen Querschnitt des Partikels A dividiert (siehe Abbildung 3.6). Somit sind Q_{ext} , Q_{sca} und Q_{abs} wie folgt definiert:

$$Q_{ext} = C_{ext} / A, \quad (3.53)$$

$$Q_{sca} = C_{sca} / A, \quad (3.54)$$

$$Q_{abs} = C_{abs} / A. \quad (3.55)$$

Die dimensionslose Konstante Q wird als Effizienzfaktor für Extinktion, Streuung und Absorption bezeichnet. Der Energieerhaltungssatz erfordert dann, dass

$$Q_{ext} = Q_{sca} + Q_{abs}. \quad (3.56)$$

Wenn I_0 die Intensität des einfallenden Lichts ist (W/m^2), fängt das Partikel $Q_{\text{ext}} \cdot \pi a^2 \cdot I_0$ Watt vom einfallenden Strahl ab, unabhängig vom Polarisationszustand des einfallenden Lichtes. Der absorbierte Anteil und der streuende Anteil werden berechnet, indem Q_{ext} durch Q_{abs} und Q_{sca} ersetzt wird.

Phasenfunktion

Wenn die Funktion $F(\theta, \varphi)$ durch den Faktor k^2 mit $k = 2\pi/\lambda$ und dem Streuquerschnitt C_{sca} geteilt wird, ergibt sich die Phasenfunktion

$$P(\theta, \varphi) = \frac{F(\theta, \varphi)}{k^2 C_{\text{sca}}}. \quad (3.57)$$

Die Phasenfunktion hat keine physikalische Dimension, und ihr Integral über alle Richtungen ist 1:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^\pi P(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi = 1. \quad (3.58)$$

Die Phasenfunktion kann als eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion betrachtet werden, die die Wahrscheinlichkeit anzeigt, dass ein Photon in eine bestimmte Richtung gestreut wird. Unter der Annahme, dass r die Entfernung vom Zentrum der Kugel, $k = 2\pi/\lambda$ und natürliches Licht der Bestrahlungsstärke I_0 (W/m^2) auf die Kugel trifft, weist das gestreute Licht in jede Richtung eine teilweise lineare Polarisation auf. Die Bestrahlungsstärke in W/m^2 beträgt

$$I = \frac{I_0(i_1 + i_2)}{2k^2 r^2}. \quad (3.59)$$

Wie bereits in Abbildung 3.1 dargestellt wird nach der Reflexion bzw. nach der Streuung die Strahlung als Strahlungsdichte in $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$ angegeben. Dadurch lässt sich die Strahlung in jedem Bereich rund um das Partikel definieren. Wenn die projizierte Fläche des Volumens in dieser Richtung A_{proj} ist, ist die Strahlung im Raumwinkel $\Omega = A_{\text{proj}}/r^2$ enthalten, so dass die durchschnittliche Strahldichte des Streuelements wie folgt definiert ist [24]:

$$L = \frac{I}{d\Omega} = \frac{I_0(i_1 + i_2)}{2k^2 A_{\text{proj}}}. \quad (3.60)$$

3.2.5 Lösung der Maxwell-Gleichung mit Matlab

In dieser Arbeit wurden die Lösungen der Maxwell-Gleichungen nach der Mie-Theorie mit dem Programm von Jan-Patrick Schäfer [42, 41] berechnet. Das Programm basiert auf Standardarbeiten von Bohren und Huffman [7]. Es ist in der Programmiersprache Matlab geschrieben und über den Matlab File Exchange Server [43] öffentlich zugänglich. Verschiedene Anpassungen und Neuerungen wurden in das Programm integriert, um die Streuung aus der Verschmutzung eines PV-Moduls

oder eines CSP-Spiegels zu berechnen. Zur Veranschaulichung wird in diesem Abschnitt die Bestrahlungsfunktion I als Graph dargestellt. Die Bestrahlungsstärke I hängt von mehreren Werten ab, die alle in die Berechnung einbezogen werden (siehe Tabelle 3.1). Da der Brechungsindex für das Medium des Partikels stark von der jeweiligen geografischen Lage abhängt, wurde ein Mittelwert aus verschiedenen Quellen [34, 38, 52] genommen.

TABELLE 3.1: Werte für eine Beispielrechnung der Streufunktion

$a = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m}$	Radius eines Partikels
$\lambda = 700 \cdot 10^{-9} \text{ m}$	Wellenlänge von Licht
$n_0 = 1,000262 + 0,000j$	Brechungsindex (real) für das äußere Medium
$n_1 = 1,560000 + 0,002j$	Brechungsindex (real + komplex) für das Medium des Partikels
$I_0 = 1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	Bestrahlungsstärke des natürlichen Lichts
$r = 1 \text{ m}$	Abstand von dem Partikelmittelpunkt

Die Mitte des Teilchens befindet sich im Ursprung des Koordinatensystems. Die Bestrahlung erfolgt in Richtung der positiven z -Achse. Die Bestrahlungsstärke I ist eine Funktion, die von θ und φ abhängt, wie in der Abbildung 3.5 dargestellt. Vereinfacht ausgedrückt, gelten alle Partikel als perfekte Kugeln. Diese Vereinfachung beseitigt die Abhängigkeit von φ . Die Streuung ist rotationssymmetrisch um die z -Achse. Aus diesem Grund ist es ausreichend, den Winkel θ auf der x -Achse und die Bestrahlungsstärke auf der y -Achse in der Abbildung 3.7 darzustellen.

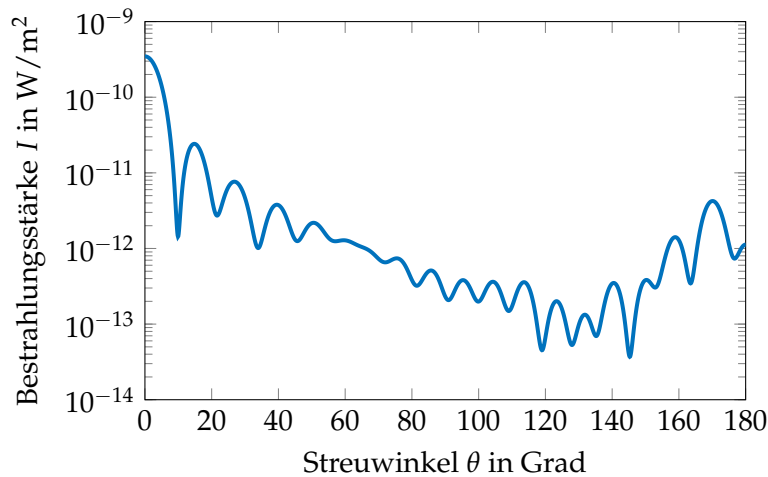


ABBILDUNG 3.7: Die Bestrahlungsstärke wird als Funktion des Polwinkels θ dargestellt. Da die Strahlung in Richtung der positiven z -Achse geht, impliziert 0° Vorwärtsstreuung (d.h. in der ursprünglichen Richtung) und 180° Rückwärtsstreuung (d.h. zurück zur Lichtquelle).

Die Bestrahlung geht in Richtung der positiven z -Achse, deshalb impliziert 0° in der Funktion I und in allen Plots Vorwärtsstreuung (d.h. in der ursprünglichen Richtung) und 180° impliziert Rückwärtsstreuung (d.h. zurück zur Quelle des Lichts). Das Bild der Streuung wird mit einer polaren Darstellung klarer, wie in Abbildung 3.8 dargestellt. Das Partikel wird bei null in der Mitte platziert. Die Kurve zeigt die jeweilige Bestrahlungsstärke in den verschiedenen Richtungen. In Abbildung 3.7 sowie in Abbildung 3.8 ist die Bestrahlungsstärke in einer logarithmischen Skala angegeben. Es wird deutlich, dass der Anteil der Vorwärtsstreuung für ein Partikel mit einem Radius von $a = 2 \cdot 10^{-6}$ m sehr groß ist im Vergleich zu den lateral gestreuten oder rückwärtigen Anteilen.

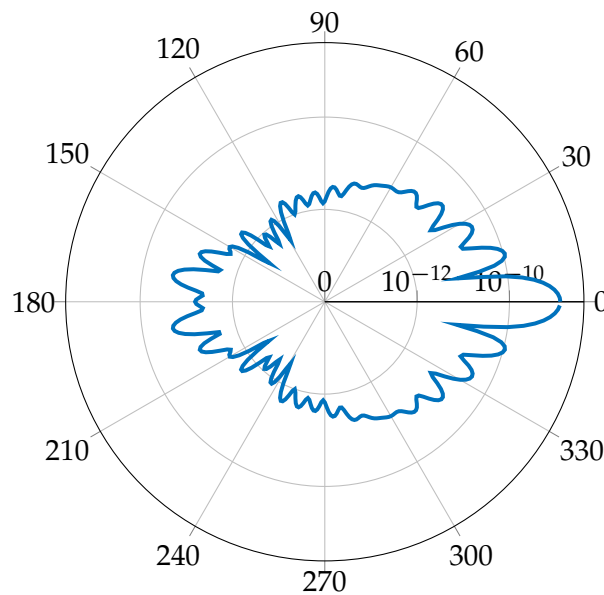


ABBILDUNG 3.8: Eine polare Darstellung wird häufig verwendet, um die Streuung auf einem Partikel darzustellen. Hier befindet sich das Partikel in der Mitte und die Verteilung der Bestrahlungsstärke wird als Kurve in alle Richtungen dargestellt. Da die Strahlung in Richtung der positiven z -Achse geht, impliziert 0° Vorwärtsstreuung (d.h. in der ursprünglichen Richtung) und 180° Rückwärtsstreuung (d.h. zurück zur Lichtquelle).

Mit den gleichen Parametern und einer Variation des Radius a kann der Effizienzfaktor Q berechnet werden. In Abbildung 3.9 sind die Effizienzfaktoren Q_{ext} , Q_{sca} und Q_{abs} dargestellt. Es wird deutlich, dass aufgrund des geringen imaginären Anteils des Partikelbrechungsindex n_1 der absorbierende Anteil vernachlässigt werden kann (gelbe Linie in Abbildung 3.9). Fast die gesamte Strahlung, die mit dem Partikel (blaue Linie in Abbildung 3.9) in Berührung kommt, wird gestreut (rote Linie in Abbildung 3.9).

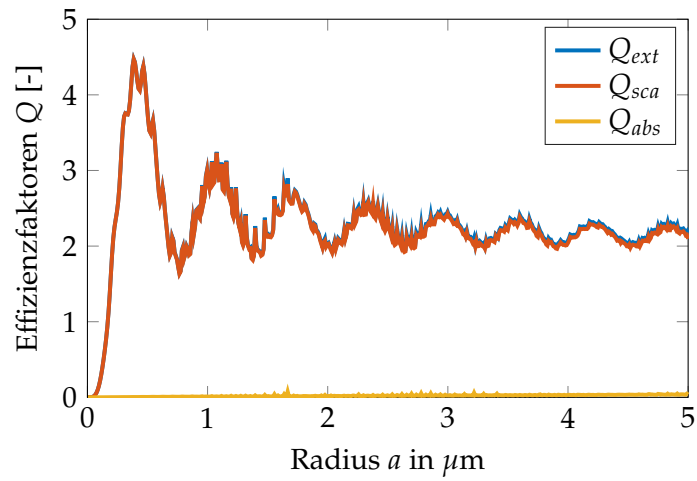


ABBILDUNG 3.9: Der Effizienzfaktor Q ist aufgetragen gegen Radius a . Die Effizienzfaktoren Q_{ext} , Q_{sca} und Q_{abs} zeigen, dass der größte Teil der Strahlung, die mit dem Partikel in Berührung kommt, gestreut wird. Der absorbierende Teil kann vernachlässigt werden.

3.3 Kamerabild

Die aufgenommenen Bilder werden im JPEG-Format gespeichert. Bei diesem Format ist das Bild in einzelne Pixel aufgeteilt. Jedes Pixel besteht aus drei Schichten und setzt sich aus einem roten, grünen und blauen Wert zusammen (siehe Abbildung 3.10). Jede dieser Farbwerte kann einen RGB-Wert zwischen 0 und 255 haben. Über das Verhältnis des roten, grünen und blauen RGB-Wertes setzt sich die Farbe des Bildes zusammen.

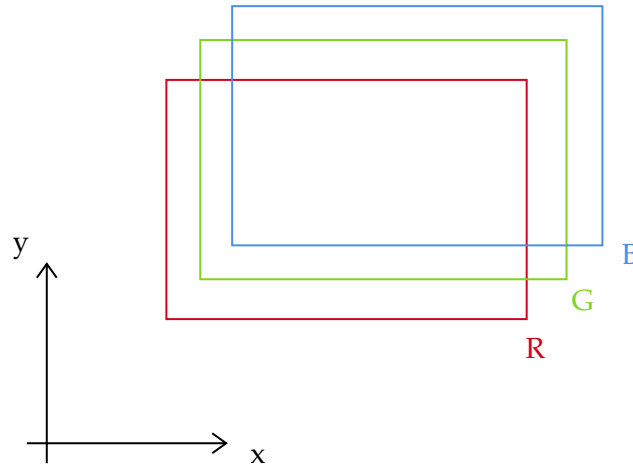


ABBILDUNG 3.10: Ein JPEG-Bild wird durch Pixel aufgebaut. Dabei besteht jedes Pixel aus einem roten, grünen und blauen Wert. Das Verhältnis dieser Werte gibt den Farbwert des Pixels an [eigene Abbildung].

Für weitere Berechnungen wird auch oft der sogenannte Grauwert verwendet. Der Grauwert soll den Helligkeits- oder Intensitätswert eines einzelnen Bildpunktes darstellen. Dieser setzt sich aus den drei RGB-Werten zusammen und hat auch einen Wert zwischen 0 und 255. Somit ist der Kameragrauwert für ein bestimmtes Pixel wie folgt definiert:

$$Cam_{\text{Grey}}^{px} = (Cam_R^{px} + Cam_G^{px} + Cam_B^{px})/3. \quad (3.61)$$

Dabei sind Cam_R^{px} , Cam_G^{px} und Cam_B^{px} jeweils die einzelnen Farbwerte des entsprechenden Pixels.

Methoden

Um die Verschmutzung auf einem Kollektor durch ein Bild zu erkennen, wird von dem entsprechenden Bild der RGB-Wert pixelweise analysiert. Es wird die Annahme gemacht, dass bei einem konstanten Hintergrundbild die Helligkeit des Messflecks in etwa proportional zum Reflexionswert an den gleichen Spiegelflecken ist. Diese Annahme beruht darauf, dass die Schmutzschicht auf einem Sonnenspiegel, je nach ihren optischen Eigenschaften (Größe, Form, Brechungsindex) einen Teil des einfallenden Lichts streut (siehe Abbildung 4.1 rote Linie). Je mehr Partikel pro Spiegelfläche vorhanden sind, desto mehr Licht wird gestreut, wenn konstante Beleuchtungsbedingungen angenommen werden. Ein Teil des gestreuten Lichts wird auf die UAV-Kamera gerichtet und trägt so dazu bei, dass der Pixel-RGB-Wert, welcher den betreffenden Spiegelbereich darstellt, heller erscheint als ein Spot mit weniger oder keinen Partikeln. Dies gilt insbesondere, wenn der Hintergrund relativ dunkel ist, so dass der zusätzliche Beitrag der Schmutzpartikel von der Kamera aufgelöst werden kann. Deshalb wird bei der Analyse die Spiegelfläche, die die Reflexion des schwarzen Absorberrohres zeigt, verwendet (siehe Abbildung 4.1 blaue Linie). Der Begriff Hintergrund stellt die Abbildung von Objekten dar, die direkt im jeweiligen Spiegelfeld reflektiert werden. Bei der Streuung an Partikeln spielt sowohl die Partikelanzahlgrößenverteilung als auch das Solarspektrum der Sonne eine wichtige Rolle. Zusätzlich zu der Streuung sollte bei der Aufnahme von Bildern immer die internen Einstellungen der Kamera berücksichtigt werden. Interne Korrekturen erschweren die Vergleichbarkeit der Bilder untereinander. Somit werden Effekte wie der Weißabgleich, die Gamma-Korrektur und die Vignettierung für die jeweils entsprechende Kamera untersucht. Bei genauer Betrachtung muss auch die Streuung durch das diffuse Licht (siehe Abbildung 4.1 grüne Linie) berücksichtigt werden. Dies wird jedoch in diesem Fall aufgrund klarer und guter Wetterbedingungen vernachlässigt. Somit setzt sich der Wert eines Pixels folgendermaßen zusammen:

$$Cam_{px} = \left(\Phi_{px}^{back} + \Phi_{px}^{scat} + \Phi_{px}^{diffuse} \right) \cdot Cam_{px}^{corr}. \quad (4.1)$$

Dabei stehen die Faktoren $\Phi_{\text{px}}^{\text{back}}$, $\Phi_{\text{px}}^{\text{scat}}$ und $\Phi_{\text{px}}^{\text{diffuse}}$ für die jeweilige Strahlungsleistung die durch den Hintergrund, die Partikelstreuung der Direktstrahlung und die Streuung des diffusen Lichts auf den Sensor der Kamera trifft. Der Faktor $\text{Cam}_{\text{px}}^{\text{corr}}$ soll dabei den korrigierten Pixel-RGB-Wert darstellen.

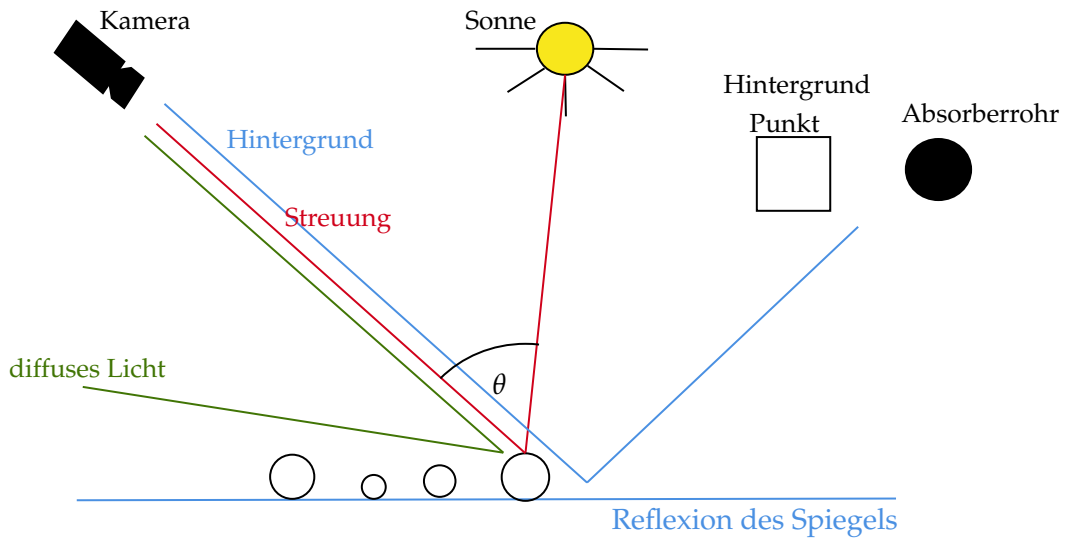


ABBILDUNG 4.1: Um eine Korrelation zwischen RGB-Wert und Verschmutzung zu finden sind mehrere Faktoren zu beachten. Sowohl die Streuung der direkten Sonneneinstrahlung als auch der Streuung an diffusem Licht haben einen Einfluss auf den RGB-Wert der Kamera. Auch der reflektierte Hintergrund ist entscheidend für eine vergleichbare Messung. Zusätzlich werden die Partikelgrößenverteilung, das Solarspektrum und interne Kameraeinstellungen in die Berechnung mit einbezogen [eigene Abbildung].

Im folgenden Kapitel werden die Faktoren Streuung (Partikelstreuung unter Einbeziehung der Partikelgrößenverteilung und des Solarspektrums), Hintergrund (Absorberreflex) und Kamera (Weißabgleich, Gamma-Korrektur, Vignettierung) einzeln diskutiert und ihr Beitrag zum RGB-Wert der Kamera dargestellt.

4.1 Mie-Streuung

In diesem Abschnitt wird der Teil des Lichts, der in die Kamera gestreut wird, in verschiedenen Schritten hergeleitet. Zu diesem Zweck wird schrittweise von einem Partikel und einer Wellenlänge ausgehend in Richtung der Realität angenähert.

4.1.1 Streuung an einer Oberfläche (nicht reflektierend)

Um zu Beginn einen einfachen Fall abzubilden, wird eine nicht reflektierende Oberfläche angenommen.

1 Pixel - 1 Partikel

In diesem Abschnitt wird die Annahme gemacht, dass genau ein Partikel im Sichtfeld eines Kamerapixels liegt. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Die Sonnenstrahlung auf ein Partikel ist in der Abbildung als rote Linie eingezeichnet. Die Strahlung wird sowohl gestreut als auch vom Partikel absorbiert. Die Verteilung der gestreuten Strahlung ist blau abgebildet. Zum RGB-Signal trägt nur das in Richtung der Kamera gestreute Licht bei, das mit der schwarzen Linie dargestellt wird.

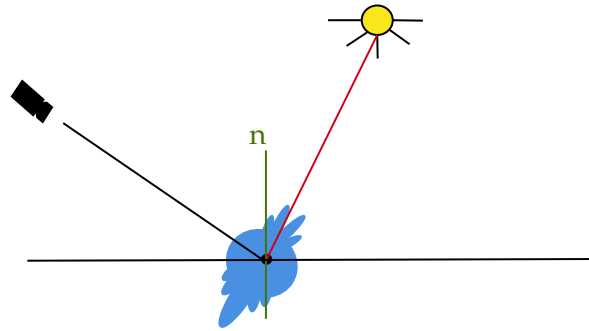


ABBILDUNG 4.2: Die Sonne scheint auf ein Partikel, das in der Abbildung als rote Linie dargestellt ist. Die Strahlung wird sowohl gestreut als auch vom Partikel absorbiert. Die Verteilung der gestreuten Strahlung ist blau abgebildet. Über die Streuung in Richtung Kamera, die mit der schwarzen Linie dargestellt ist, soll die Verschmutzung auf dem Spiegel erkannt werden [eigene Abbildung].

Die Verteilung der Streuung $L(\theta, \varphi, r)$ kann durch die Gleichung 3.60 in Abhängigkeit vom Sonnenstand berechnet werden:

$$L(\theta, \varphi, r) = \frac{F(\theta, \varphi)}{k^2 A_{\text{proj}}} I_{\text{sun}} \left[\frac{W}{m^2 \cdot sr} \right]. \quad (4.2)$$

$L(\theta, \varphi)$ zeigt die Strahldichte des gestreuten Lichts innerhalb eines Raumwinkels, der durch die Fläche A_{proj} definiert wird. Die Strahldichte hängt auch vom Polarwinkel θ und vom Azimutwinkel φ ab. $F(\theta, \varphi)$ ist eine dimensionslose Funktion, die die Verteilung der gestreuten Strahlung in Abhängigkeit von θ und φ angibt. Sie wird oft als Amplitudenfunktion bezeichnet. k repräsentiert die Ausbreitungskonstante und ist definiert als $k = 2\pi/\lambda$ in $1/m$. In einem Medium mit einem Brechungsindex m ist k definiert als $k = 2\pi m/\lambda$. A_{proj} ist die Fläche die durch den Raumwinkel Ω definiert wird. I_{sun} ist die Bestrahlungsstärke der Sonne in W/m^2 . Die Integration der Strahldichte $L(\theta, \varphi)$ des gestreuten Lichts über den Raumwinkel Ω_{px} und über die Fläche eines Kamerapixels A_{PxCam} führt zu der Strahlungsleistung, die auf ein bestimmtes Pixel der Kamera fällt. Die Strahlungsleistung $\Phi(\text{PxCam})$ wird wie folgt

berechnet:

$$\Phi(P_{x_{\text{Cam}}}) = \int_{A_{P_{x_{\text{Cam}}}}} \int_{\Omega_{\text{px}}} L(\theta, \varphi) d\Omega dA \quad [W]. \quad (4.3)$$

$\Phi(P_{x_{\text{Cam}}})$ ist eine Strahlungsleistung in W, die auf ein bestimmtes Pixel der Kamera fällt, weil das Sonnenlicht an einem Partikel gestreut wird. $A_{P_{x_{\text{Cam}}}}$ ist die Fläche eines bestimmten Kamerapixels in m^2 . Ω_{px} ist der Raumwinkel der durch die Streuung von Partikeln auf einem Pixel aufgespannt wird.

1 Pixel - 2 Partikel

In diesem Abschnitt wird die Annahme erweitert, dass genau zwei Partikel im Sichtfeld eines Kamerapixels liegen. Der schematische Aufbau ist in der Abbildung 4.3 dargestellt. Die Sonnenstrahlung ist als rote Linie eingezeichnet und wird sowohl vom Partikel gestreut als auch absorbiert. Die Verteilung der gestreuten Strahlung ist in blau abgebildet. Auch hier wird das Streulicht betrachtet, welches in ein Kamerapixel fällt.

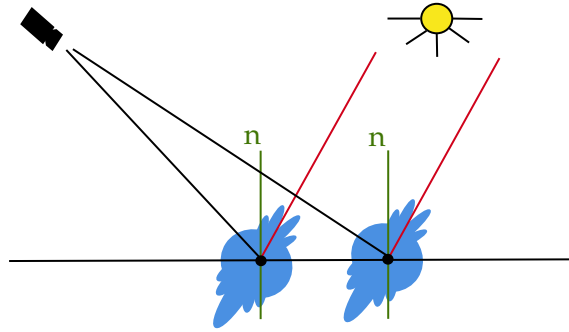


ABBILDUNG 4.3: Die Sonne scheint auf ein Partikel, das in der Abbildung als rote Linie dargestellt ist. Die Strahlung wird sowohl gestreut als auch vom Partikel absorbiert. Die Verteilung der gestreuten Strahlung ist blau abgebildet. Über die Streuung in Richtung Kamera, die mit der schwarzen Linie dargestellt ist, soll die Verschmutzung auf dem Spiegel erkannt werden [eigene Abbildung].

Zwei Partikel auf der Oberfläche verändern auch den Winkel (schwarze Linie zur Oberflächennormalen, siehe Abbildung 4.3) in Richtung der Kamera. Dies impliziert eine Änderung der Strahldichte, welche durch die einzelnen Partikel in Richtung der Kamera gestreut werden. Wenn die Partikel nicht die gleiche Größe haben ($a_1 \neq a_2$), unterscheidet sich auch die Amplitudenfunktion $F(\theta, \varphi)$. Aus diesem Grund werden die Integrale über den Bereich $P_{x_{\text{Cam}}}$ für jedes Partikel einzeln berechnet und

anschließend addiert. Somit ergibt sich die Strahlungsleistung $\Phi(P_{x_{\text{Cam}}})$ wie folgt:

$$\Phi(P_{x_{\text{Cam}}}) = \overbrace{\int_{A_{P_{x_{\text{Cam}}}}} \int_{\Omega_{px}} L_1(\theta_1, \varphi_1) d\Omega dA}^{\text{Partikel 1}} + \overbrace{\int_{A_{P_{x_{\text{Cam}}}}} \int_{\Omega_{px}} L_2(\theta_2, \varphi_2) d\Omega dA}^{\text{Partikel 2}} \quad [W]. \quad (4.4)$$

Somit ist die gesamte Strahldichte, die von mehreren Partikeln in eine gegebene Richtung gestreut wird, nur die Summe der von den einzelnen Partikeln gestreuten Strahldichten ausgewertet bei den entsprechenden Winkeln bzw. Koordinaten [7].

1 Pixel - N Partikel

In diesem Abschnitt wird die Annahme erweitert, dass N Partikel im Sichtfeld eines Kamerapixels liegen. Der schematische Aufbau ist in der Abbildung 4.4 dargestellt. Die Sonne strahlt auf eine Fläche, die ein Pixel auf der Oberfläche (Spiegel) darstellen soll. Im Bereich $A_{P_{x_{\text{Mir}}}}$ befinden sich N Partikel. Die Strahlung wird sowohl gestreut als auch von den Partikeln absorbiert. Über die Streuung in Richtung Kamera, die mit der schwarzen Linie dargestellt ist, soll die Verschmutzung auf dem Spiegel erkannt werden.

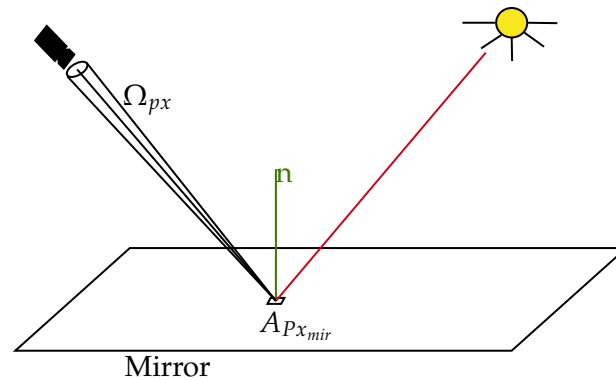


ABBILDUNG 4.4: Die Sonne scheint auf N Partikel, die im Sichtfeld eines Kamerapixels liegen. Die Strahlung wird sowohl gestreut als auch von den Partikeln absorbiert. Über die Fläche $A_{P_{x_{\text{Cam}}}}$ und den Raumwinkel Ω_{px} kann die gestreute Strahlung in Richtung der Kamera berechnet werden [eigene Abbildung].

Auch in diesem Fall wird die gestreute Strahldichte jedes einzelnen Teilchens über den Raumwinkel Ω_{px} und über die Oberfläche $A_{P_{x_{\text{Cam}}}}$ integriert und anschließend addiert. Der Index $i \in \{1, \dots, N\}$ repräsentiert dabei die Anzahl der Partikel.

Somit ergibt sich die Strahlungsleistung $\Phi(P_{\text{xCam}})$ wie folgt:

$$\Phi(P_{\text{xCam}}) = \sum_{i=1}^N \left(\int_{A_{\text{PxCam}}} \int_{\Omega_{\text{px}}} L_i(\theta_i, \varphi_i) d\Omega dA \right) [W]. \quad (4.5)$$

Da sich der Raumwinkel Ω_{px} und die Oberfläche A_{PxCam} während einer Aufnahme nicht ändern, können beide Werte als konstant angenommen, wodurch sich die Gleichung

$$\Phi(P_{\text{xCam}}) = \int_{A_{\text{PxCam}}} \int_{\Omega_{\text{px}}} \left(\sum_{i=1}^N L_i(\theta_i, \varphi_i) \right) d\Omega dA [W] \quad (4.6)$$

ergibt. Unter der Annahme, dass der Abstand der Kamera zur Spiegelfläche im Verhältnis zur Pixelgröße sehr groß ist, können die Winkel θ_i, φ_i als konstant für ein Pixel angenommen werden. Daher sind die Winkel θ, φ nicht mehr vom Index i abhängig. Allerdings variiert L_i je nach Partikelamplitudenfunktion (Variation in Radius a , Wellenlänge λ und Brechungsindex n jedes Partikels), so dass L_i nicht als konstant angenommen werden kann. Aus diesem Grund kann das Integral nicht vernachlässigt werden und es ergibt sich für die Strahlungsleistung $\Phi(P_{\text{xCam}})$ folgende Formel:

$$\Phi(P_{\text{xCam}}) = \int_{A_{\text{PxCam}}} \int_{\Omega_{\text{px}}} \left(\sum_{i=1}^N L_i(\theta, \varphi) \right) d\Omega dA [W]. \quad (4.7)$$

4.1.2 Streuung auf einer reflektierenden Oberfläche

Für die Streuung eines Partikels auf der reflektierenden Oberfläche (Spiegel), wird zusätzlich zur Streuung von $L_i(\theta_I, \varphi_I, r)$ vor der Reflexion (Streuung beim ersten Durchgang von Strahlung durch die Schmutzschicht), die Streuung $L_i(\theta_{II}, \varphi_{II}, r)$ nach der Reflexion (Streuung beim zweiten Durchgang von Strahlung durch die Verschmutzungsschicht), die durch den Spiegel verursacht wird, berücksichtigt. Sowohl die Streuung vor als auch nach der Reflexion trägt dazu bei, dass eine bestimmte Strahlungsleistung in ein Pixel der Kamera gelangt:

$$\Phi(P_{\text{xCam}}) = \int_{A_{\text{PxCam}}} \int_{\Omega_{\text{px}}} \left(\sum_{i=1}^N [L_i(\theta_I, \varphi_I) + L_i(\theta_{II}, \varphi_{II})] \right) d\Omega dA [W]. \quad (4.8)$$

Berechnung des Streuwinkels

Grundsätzlich werden für die Berechnung der Strahldichte zwei verschiedene Szenarien betrachtet. Zunächst wird die Streuung an einem Partikel vor der Reflexion sun_I berechnet. Der schematische Aufbau ist in der Abbildung 4.5 dargestellt. Hier ist sun_I der Vektor vom streuenden Ursprung zum Sonnenstand (rote Linie). cam_I ist der Vektor vom streuenden Ursprung zur Kameraposition (schwarze Linie). cam_{II} ist

der Vektor vom streuenden Ursprung bis zur reflektierten Kameraposition (schwarze Strichlinie). Das Licht wird direkt (cam_I) und indirekt (cam_{II}) durch den Spiegel in die Kamera gestreut. Damit die Strahldichte durch ein Oberflächenintegral berechnet werden kann, sind die Winkel zwischen sun_I und cam_I und sun_I und cam_{II} erforderlich. Die Winkel werden immer aus der Richtung der Sonneneinstrahlung berechnet, da die Richtung als 0° Strahlungsdichteverteilung definiert ist.

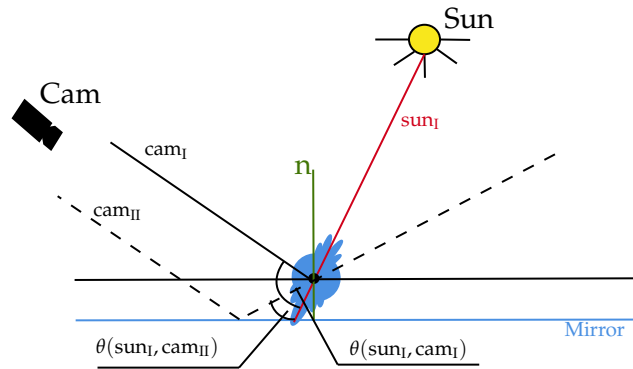


ABBILDUNG 4.5: Das Sonnenlicht wird vom Spiegel zweimal in Richtung Kamera gestreut. Aus diesem Grund müssen sowohl die direkte Streuung (schwarze Linie) als auch die indirekte Streuung (schwarze Strichlinie) über den Spiegel beobachtet werden [eigene Abbildung].

Anschließend wird die Streuung an einem Partikel für die Sonneneinstrahlung nach der Reflexion sun_{II} berechnet. Der schematische Aufbau ist in der Abbildung 4.6 dargestellt. Hier ist sun_{II} der Vektor vom streuenden Ursprung bis zur reflektierten Sonnenposition (rote Strichlinie). cam_I ist der Vektor vom streuenden Ursprung zur Kameraposition (schwarze Linie). cam_{II} ist der Vektor vom streuenden Ursprung bis zur reflektierten Kameraposition (schwarze Strichlinie). Auch hier wird das Licht direkt (cam_I) und indirekt (cam_{II}) durch den Spiegel in die Kamera gestreut. Damit die Strahldichte durch ein Oberflächenintegral berechnet werden kann, werden die Winkel zwischen sun_{II} und cam_I und sun_{II} und cam_{II} benötigt. In diesem Fall werden die Winkel aus der Richtung der reflektierten Sonneneinstrahlung berechnet, denn die Richtung ist als 0° der Strahlungsdichteverteilung definiert.

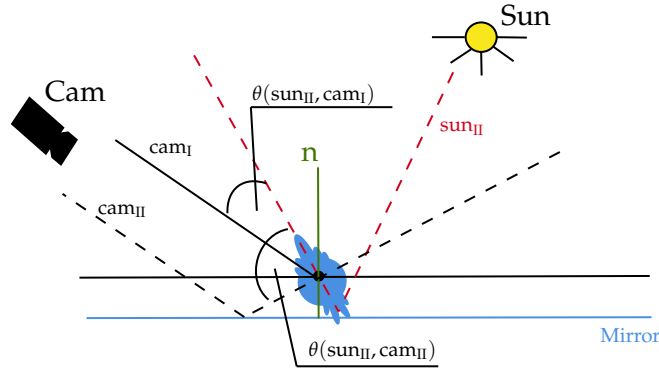


ABBILDUNG 4.6: Das reflektierte Licht wird ebenfalls zweimal in Richtung Kamera gestreut. Aus diesem Grund müssen sowohl die direkte Streuung (schwarze Linie) als auch die indirekte Streuung (schwarze Strichlinie) über den Spiegel beobachtet werden [eigene Abbildung].

In beiden Szenarien wird zunächst nur die Direktstrahlung für sun_I und sun_{II} betrachtet und die Diffusstrahlung in einem weiteren Schritt berechnet. Zudem wird die Mehrfachstreuung vernachlässigt, was durch die geringe Partikeldichte eine gute Annäherung ist. Um die Strahldichte zu berechnen, die in Richtung Kamera geht, sind die Winkel $\theta(\text{sun}_I, \text{cam}_I)$, $\theta(\text{sun}_I, \text{cam}_{II})$, $\theta(\text{sun}_{II}, \text{cam}_I)$ und $\theta(\text{sun}_{II}, \text{cam}_{II})$ erforderlich. Diese Winkel sind in Abbildung 4.5 und 4.6 dargestellt. Die Winkel θ_I und θ_{II} in der Gleichung 4.8 bestehen aus den Winkeln $\theta(\text{sun}_I, \text{cam}_I)$, $\theta(\text{sun}_I, \text{cam}_{II})$ und $\theta(\text{sun}_{II}, \text{cam}_I)$, $\theta(\text{sun}_{II}, \text{cam}_{II})$. Die Winkel φ_I und φ_{II} können vernachlässigt werden, da die Gesamtstreuung rotationssymmetrisch um die Strahlungsachse (z-Achse) ist. Aus diesem Grund ist die auf ein Kamerapixel einfallende Strahlungsleistung wie folgt aufgebaut:

$$\Phi(P_{X_{\text{Cam}}}) = \int_{A_{P_{X_{\text{Cam}}}}} \int_{\Omega_{\text{px}}} \left(\sum_{i=1}^N [1.00 \cdot L_i(\theta_{\text{sun}_I, \text{cam}_I}) + \rho_{\text{mirr}} \cdot L_i(\theta_{\text{sun}_I, \text{cam}_{II}}) + \rho_{\text{mirr}} \cdot L_i(\theta_{\text{sun}_{II}, \text{cam}_I}) + \rho_{\text{mirr}}^2 \cdot L_i(\theta_{\text{sun}_{II}, \text{cam}_{II}})] \right) d\Omega dA. \quad (4.9)$$

Bei jeder Reflexion am Spiegel wird die Strahldichte durch Transmission abgeschwächt. Der Transmissionsgrad wird mit ρ_{mirr} in die Berechnung einbezogen. Bei zweimaliger Reflexion geht der Faktor quadratisch in die Berechnung mit ein.

Kamerawinkel

Um weitere Annahmen über die Kamera zu treffen und die Berechnung der Strahlungsleistung in Richtung Kamera zu korrigieren, werden die Winkel α_{sun} und α_{cam} bestimmt. Der Winkel zwischen der Spiegelnormalen n (grüne Linie) und dem Vektor zur Sonne sun_I (rote Linie) wird als α_{sun} definiert (siehe Abbildung 4.7). Der Winkel zwischen der Spiegelnormalen n (grüne Linie) und dem Vektor zur Kamera cam_I (schwarze Linie) wird α_{cam} genannt (siehe Abbildung 4.7).

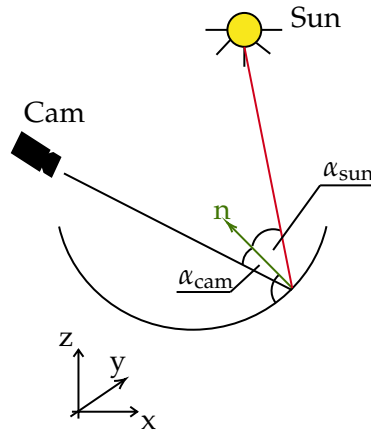


ABBILDUNG 4.7: Der Winkel zwischen der Spiegelnormalen n (grüne Linie) und dem Vektor zur Sonne sun_I (rote Linie) wird α_{sun} definiert. Der Winkel zwischen der Spiegelnormalen n (grüne Linie) und dem Vektor zur Kamera cam_I (schwarze Linie) wird α_{cam} genannt [eigene Abbildung].

In Abbildung 4.8 stellt die rote Linie die Bestrahlungsstärke der Sonne I_0 dar. Diese Strahlung trifft auf die Oberfläche A_{PxMir} auf dem Spiegel. A_{PxMir} repräsentiert den Bereich, der durch ein Pixel A_{PxCam} der Kameralinse gesehen wird. Auf der Oberfläche A_{PxMir} wird die Strahlung von den Partikeln gestreut. Die Streuung in Richtung Kamera wird als schwarze Linie dargestellt. Die Strahlungsdichte erreicht das Objektiv der Kamera senkrecht, wodurch eine Winkelkorrektur in diesem Bereich der Linse nicht erforderlich ist.

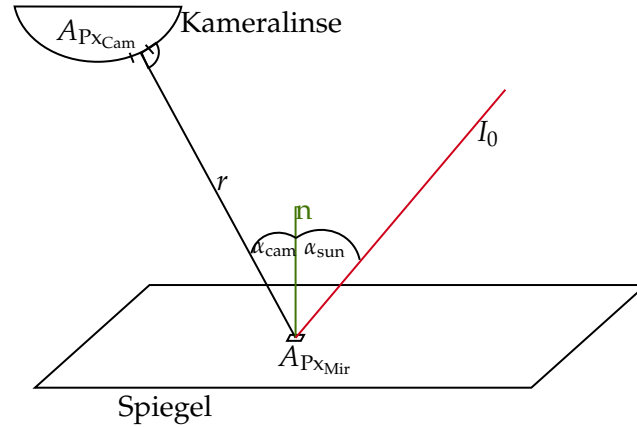


ABBILDUNG 4.8: Diese Strahlung I_0 trifft auf die Oberfläche $A_{Px_{Mir}}$ auf dem Spiegel. $A_{Px_{Mir}}$ repräsentiert den Bereich, der durch ein Pixel $A_{Px_{Cam}}$ der Kameralinse gesehen wird. Die gestreute Bestrahlungsstärke erreicht das Objektiv der Kamera senkrecht. Da die Strahlung senkrecht auf die Linse trifft, ist eine Korrektur im Bereich der Linse nicht erforderlich [eigene Abbildung].

Die Fläche $A_{Px_{Mir}}$, die vom Kameraobjektivbereich $A_{Px_{Cam}}$ gesehen wird, ist abhängig vom Winkel α_{cam} . Abbildung 4.9 soll diese Abhängigkeit verdeutlichen. Bei einem kleinen Winkel α_{cam} ist die Fläche $A_{Px_{Mir}}$, die vom Kamerapixel $A_{Px_{Cam}}$ projiziert wird, relativ klein (siehe Abbildung 4.9 auf der linken Seite). Je größer der Winkel α_{cam} wird, desto größer wird die projizierte Fläche (siehe Abbildung 4.9 auf der rechten Seite).

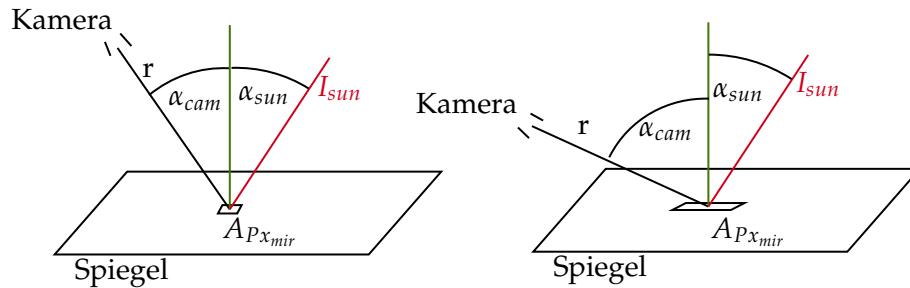


ABBILDUNG 4.9: Der Bereich $A_{Px_{Mir}}$, der vom Kameraobjektivbereich $A_{Px_{Cam}}$ gesehen wird, ist abhängig vom Winkel α_{cam} . Bei einem kleinen Winkel α_{cam} ist die Fläche $A_{Px_{Mir}}$, die vom Kamerapixel $A_{Px_{Cam}}$ projiziert wird, relativ klein. Je größer der Winkel α_{cam} wird, desto größer wird die projizierte Fläche [eigene Abbildung].

Dieser Effekt wird durch die Anwendung einer Kosinus-Korrektur kompensiert. $A_{\text{PxMir}}(0)$ ist definiert als der Bereich, in dem sich die Kamera senkrecht zum Spiegel befindet. Somit lässt sich die Fläche $A_{\text{PxMir}}(\alpha_{\text{cam}})$ je nach Winkel α_{cam} wie folgt berechnen:

$$A_{\text{PxMir}}(\alpha_{\text{cam}}) = \frac{A_{\text{PxMir}}(0)}{\cos(\alpha_{\text{cam}})}. \quad (4.10)$$

Darüber hinaus haben verschiedene Faktoren wie der Abstand der Kamera zum Streupunkt und die Eigenschaften der Kamera einen Einfluss auf die Größe der Fläche A_{PxMir} . Durch die Änderung der Fläche A_{PxMir} auf dem Spiegel ändert sich auch die Anzahl der Partikel im Pixelbereich. Aus diesem Grund wird eine Partikelflächendichte eingeführt. Die Partikelflächendichte ist definiert als die Anzahl der Partikel pro Fläche. Unter der Annahme, dass dieser Wert über den gesamten Spiegel konstant ist, kann die Anzahl der Partikel N auch durch α_{cam} korrigiert werden:

$$N(\alpha_{\text{cam}}) = \frac{N_0}{\cos(\alpha_{\text{cam}})}. \quad (4.11)$$

Der Parameter N_0 definiert die Anzahl der Partikel pro Einheitsfläche. Mithilfe von N_0 kann die Strahlungsleistung aus Gleichung 4.9 modifiziert werden:

$$\Phi(\text{PxCam}) = \int_{A_{\text{PxCam}}} \int_{\Omega_{\text{px}}} \left(\sum_{i=1}^{N(\alpha_{\text{cam}})} [1,00 \cdot L_i(\theta_{\text{sunI}, \text{camI}}) + \right. \\ \left. \rho_{\text{mirr}} \cdot L_i(\theta_{\text{sunI}, \text{camII}}) + \right. \\ \left. \rho_{\text{mirr}} \cdot L_i(\theta_{\text{sunII}, \text{camI}}) + \right. \\ \left. \rho_{\text{mirr}}^2 \cdot L_i(\theta_{\text{sunII}, \text{camII}}) \right] \Big) d\Omega dA. \quad (4.12)$$

Der Faktor $N(\alpha_{\text{cam}})$ kann weiterhin nach der Formel 4.11 unterteilt und dem Integral vorangestellt werden. Damit ergibt sich die Strahlungsleistung $\Phi(\text{PxCam})$ wie folgt:

$$\Phi(\text{PxCam}) = \frac{1}{\cos(\alpha_{\text{cam}})} \int_{A_{\text{PxCam}}} \int_{\Omega_{\text{px}}} \left(\sum_{i=1}^{N_0} [1,00 \cdot L_i(\theta_{\text{sunI}, \text{camI}}) + \right. \\ \left. \rho_{\text{mirr}} \cdot L_i(\theta_{\text{sunI}, \text{camII}}) + \right. \\ \left. \rho_{\text{mirr}} \cdot L_i(\theta_{\text{sunII}, \text{camI}}) + \right. \\ \left. \rho_{\text{mirr}}^2 \cdot L_i(\theta_{\text{sunII}, \text{camII}}) \right] \Big) d\Omega dA \quad (4.13)$$

Über die Gleichung 4.13 kann die Strahlungsleistung berechnet werden, die von Partikeln in Richtung der Kamera gestreut wird. Dabei werden die geometrischen Gegebenheiten, wie die Position der Kamera und der Sonne als auch der Transmissionsgrad berücksichtigt. Die Strahldichteverteilung L_i wird an vier verschiedenen Winkeln ausgewertet. L_i ist dabei abhängig von dem Radius a , der Wellenlänge λ

und dem Brechungsindex n jedes Partikels. Aus diesem Grund müssen zusätzlich zu den geometrischen Betrachtungen die Partikelgrößenverteilung und das Solarpektrum eingebunden werden. Des Weiteren muss der Anteil bestimmt werden, welcher vom ursprünglich auftreffenden Licht, gestreut bzw. absorbiert wird.

Streueffizienz

Um zu berechnen, welcher Anteil der gesamten Strahlung an einer Fläche gestreut wird, wird der Effizienzfaktor Q zur Hilfe genommen. Die Streueffizienz stellt das Verhältnis der vom Partikel gestreuten Energie zur Gesamtenergie des einfallenden Strahls dar, die durch den geometrischen Querschnitt des Partikels abgefangen wird. Ebenso ist die Absorptionseffizienz definiert als der Anteil des einfallenden Strahls, der pro Querschnittsfläche des Partikels absorbiert wird. Die aus dem einfallenden Strahl entfernte Gesamtenergie, die Extinktionsenergie, ist die Summe der gestreuten und absorbierten Energie. Die entsprechende Extinktionseffizienz ist gegeben durch

$$Q_{ext} = Q_{sca} + Q_{abs}. \quad (4.14)$$

Abbildung 4.10 soll das Problem nochmals graphisch erläutern. Im linken Bild sind verschiedene Partikel auf einem Spiegel dargestellt. Die Strahlung (rot) kann mit einem Partikel in Form von Streuung und Absorption interagieren oder direkt vom Spiegel reflektiert werden. Das rechte Bild zeigt grafisch, wie viel vom einfallenden Licht an einem Partikel gestreut und wie viel absorbiert wird. Der Querschnitt C_{sca} ist eine Oberfläche, die das Verhältnis der Streuungsenergie zur Gesamtenergie darstellt. Wird der Querschnitt C_{sca} durch die geometrischen Fläche A dividiert, kann der Effizienzfaktor Q_{sca} bestimmt werden.

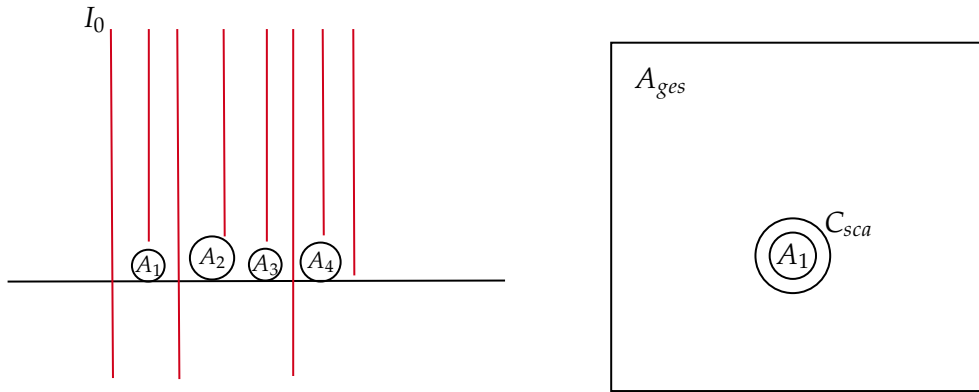


ABBILDUNG 4.10: Links - Die Bestrahlungsstärke I_0 in W/m^2 (rot) ist definiert als die Leistung Φ_0 dividiert durch den Bereich A_{ges} . Nicht die gesamte Strahlung trifft auf ein Partikel und wird gestreut. Rechts - Die in alle Richtungen gestreute Gesamtenergie soll gleich der Energie der einfallenden Welle sein, die auf die Fläche C_{sca} fällt. Die dimensionslose Konstante Q_{sca} wird über $Q_{sca} = C_{sca} / A$ berechnet [eigene Abbildung].

Die Strahlungsleistung Φ_0 in Watt ist definiert als die Gesamtleistung, die auf die Oberfläche A_{ges} trifft. Φ_{abs} ist die Leistung, die durch ein Partikel A_1 absorbiert wird. Φ_{sca} ist die Leistung, die durch das Partikel A_1 gestreut wird. Φ_{ext} ist die Gesamtleistung die in Kontakt mit dem Partikel A_1 kommt. Mit den Effizienzfaktor Q kann eine lineare Verbindung zwischen Strahlungsleistung Φ und dem geometrischen Querschnitt entwickelt werden:

$$\frac{\Phi_{abs}}{\Phi_0} = Q_{abs} \frac{A_1}{A_{ges}}, \quad (4.15)$$

$$\frac{\Phi_{sca}}{\Phi_0} = Q_{sca} \frac{A_1}{A_{ges}}, \quad (4.16)$$

$$\frac{\Phi_{ext}}{\Phi_0} = Q_{ext} \frac{A_1}{A_{ges}}. \quad (4.17)$$

Über das gleiche Verhältnis lässt sich auch der Anteil der Bestrahlungsstärke bestimmen:

$$\frac{I_{abs}}{I_0} = Q_{abs} \frac{A_1}{A_{ges}}, \quad (4.18)$$

$$\frac{I_{sca}}{I_0} = Q_{sca} \frac{A_1}{A_{ges}}, \quad (4.19)$$

$$\frac{I_{ext}}{I_0} = Q_{ext} \frac{A_1}{A_{ges}}. \quad (4.20)$$

Somit lässt sich über das geometrische Flächenverhältnis und mithilfe des Effizienzfaktors berechnen, wie viel Strahlung gestreut und absorbiert wird. Nun sind auf einem verschmutzten Spiegel unterschiedliche Größen an Verschmutzungspartikeln vorhanden. Aus diesem Grund wird mithilfe einer Partikelgrößenverteilung

versucht, den Anteil an gestreuter Bestrahlungsstärke bzw. Strahldichte zu erschließen.

Integrierung der Partikelgrößenverteilung

Das Histogramm 4.11 der Partikelgrößenverteilung kann verwendet werden, um eine stückweise Schätzung der Dichtefunktion $f(a_i)$ zu erhalten. Der Index $i \in \{1, \dots, N\}$ repräsentiert dabei die einzelnen Partikel.

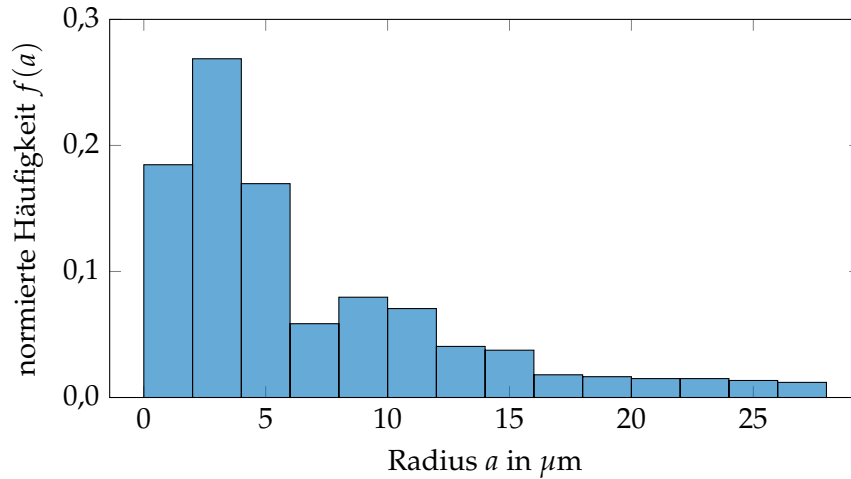


ABBILDUNG 4.11: Normalisierte Partikelgrößenverteilung aus [40]. Dabei ist die normierte Häufigkeit aufgetragen gegen den Radius a . Das Histogramm kann auch zur Bestimmung der Dichtefunktion verwendet werden, die eine Gewichtung für die diskrete Partikelgröße festlegt.

Die stückweise Dichtefunktion weist jeder Partikelgröße eine Gewichtung zu. Aus diesem Grund gibt das Integral bzw. die Summe über die Dichtefunktion immer den Wert 1 an:

$$\sum_{i=1}^N f(a_i) = 1. \quad (4.21)$$

In der Simulation wird das Licht nicht nur von einem Partikel, sondern von N Partikel gestreut. Aus diesem Grund wird die Dichtefunktion erneut mit der Gesamtzahl der Partikel multipliziert:

$$N_{ges} = N_{ges} \cdot \sum_{i=1}^N f(a_i). \quad (4.22)$$

Um nun aus dem Flächenverhältnis eine Aussage treffen zu können, wie viel Licht

gestreut wird, wird die von den Partikeln abgedeckte Fläche A_{part} benötigt. Die Fläche A_{part} wird über die Formel

$$A_{part} = N_{ges} \sum_{i=1}^N (f(a_i) \cdot A(a_i) \cdot Q_{sca}(a_i)) \quad (4.23)$$

bestimmt. Da die einfallende Bestrahlungsstärke I_0 immer auf die gesamte Fläche A_{ges} wirkt, wird zur Berechnung des gestreuten Anteils das Verhältnis zwischen A_{part} und A_{ges} angegeben. Der relative Bedeckungsgrad berechnet sich über die Formel

$$\Gamma = \frac{A_{part}}{A_{ges}}. \quad (4.24)$$

Die Multiplikation des relativen Bedeckungsgrades Γ mit der Bestrahlungsstärke I_0 ergibt die Bestrahlungsstärke I_{abs} , I_{sca} und I_{ext} für die Absorption, die Streuung und die Extinktion:

$$I_{abs} = I_0 \cdot \frac{N_{ges}}{A_{ges}} \sum_{i=1}^N (f(a_i) \cdot A(a_i) \cdot Q_{abs}(a_i)), \quad (4.25)$$

$$I_{sca} = I_0 \cdot \frac{N_{ges}}{A_{ges}} \sum_{i=1}^N (f(a_i) \cdot A(a_i) \cdot Q_{sca}(a_i)), \quad (4.26)$$

$$I_{ext} = I_0 \cdot \frac{N_{ges}}{A_{ges}} \sum_{i=1}^N (f(a_i) \cdot A(a_i) \cdot Q_{ext}(a_i)). \quad (4.27)$$

Da die Berechnung des Effizienzfaktors Q nicht nur von dem Radius a des Partikels abhängt sondern auch noch von der Wellenlänge λ , muss bei der Betrachtung von natürlichem Licht auch das Solarspektrum mit einbezogen werden.

Integrierung des Solarspektrums

Das Histogramm 4.12 des Sonnenspektrums kann verwendet werden, um eine stückweise Schätzung der Dichtefunktion $s(\lambda_j)$ zu erhalten. Der Index $j \in \{1, \dots, M\}$ repräsentiert eine diskrete Wellenlänge.

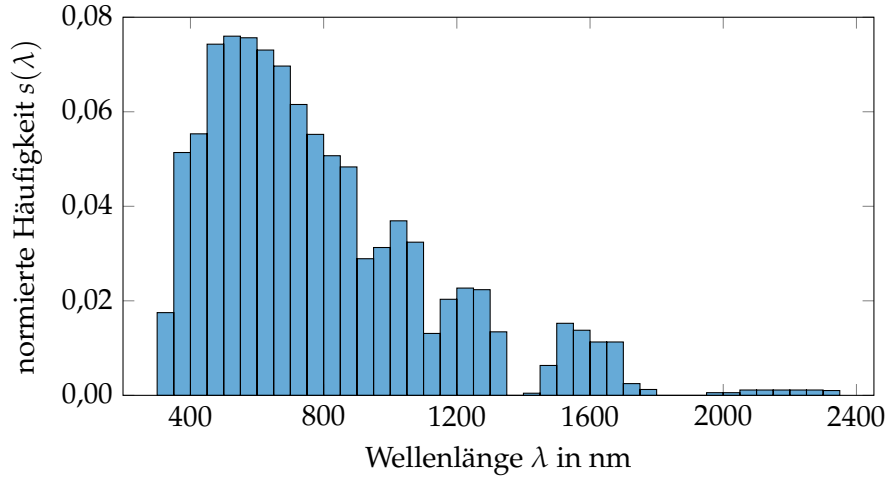


ABBILDUNG 4.12: Normierte Sonnenspektrumsverteilung mit $AOD = 0,084$ und $AM = 1,5$. Dabei ist die normierte Häufigkeit aufgetragen gegen die Wellenlänge λ . Das Histogramm kann auch zur Bestimmung der Dichtefunktion verwendet werden, die eine Gewichtung für diskrete Wellenlängen festlegt.

Die Dichtefunktion weist jeder diskreten Wellenlänge eine Gewichtung zu. Aus diesem Grund gibt das Integral der Dichtefunktion immer den Wert 1 an:

$$\sum_{j=1}^M s(\lambda_j) = 1. \quad (4.28)$$

In der folgenden Formel werden sowohl die Partikelgrößenverteilung als auch das Solarspektrum bei der Berechnung der Bestrahlungsstärke berücksichtigt. Die Gewichtungsfunktion $s(\lambda_j)$ wird dabei in Gleichung 4.25, 4.26 und 4.27 aufgenommen. Die Bestrahlungsstärke I_{abs} , I_{sca} und I_{ext} wird weiterhin aus dem Verhältnis der Fläche, die durch Partikel bedeckt ist, zur Gesamtfläche berechnet:

$$I_{abs} = I_0 \cdot \frac{N_{ges}}{A_{ges}} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (f(a_i) \cdot A(a_i) \cdot Q_{abs}(a_i, \lambda_j) \cdot s(\lambda_j)), \quad (4.29)$$

$$I_{sca} = I_0 \cdot \frac{N_{ges}}{A_{ges}} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (f(a_i) \cdot A(a_i) \cdot Q_{sca}(a_i, \lambda_j) \cdot s(\lambda_j)), \quad (4.30)$$

$$I_{ext} = I_0 \cdot \frac{N_{ges}}{A_{ges}} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (f(a_i) \cdot A(a_i) \cdot Q_{ext}(a_i, \lambda_j) \cdot s(\lambda_j)). \quad (4.31)$$

Über I_{sca} ist die Gesamtbestrahlungsstärke in W/m^2 bekannt, die in alle Richtungen gestreut wird. Es ist nicht bekannt, welcher Teil der Bestrahlungsstärke in welche Richtung gestreut wird. Um die Richtung in die Gleichung zu integrieren, wird die Phasenfunktion

$$P(\theta, \varphi) = \frac{F(\theta, \varphi)}{k^2 C_{sca}} \quad (4.32)$$

verwendet. Da die Phasenfunktion über keine physikalische Einheit verfügt und die Integration über alle Richtungen 1 ergibt, können die Richtungseigenschaften dadurch integriert werden. Die Multiplikation von I_{sca} mit der Phasenfunktion $P(\theta, \varphi)$ ergibt eine Amplitudenfunktion, die die Bestrahlungsstärke des gestreuten Lichts in alle Raumrichtungen (definiert durch θ und φ) darstellt. I_{sca} kann über die Formel

$$I_{sca}(\theta, \varphi) = I_0 \cdot \frac{N_{ges}}{A_{ges}} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (f(a_i) \cdot A(a_i) \cdot Q_{sca}(a_i, \lambda_j) \cdot s(\lambda_j)) \cdot P(a_i, \lambda_j, \theta, \varphi) \quad (4.33)$$

berechnet werden. Da der Anteil des gestreuten Lichts über das Flächenverhältnis berechnet wird, ist die Einheit abhängig von der einfallenden Strahlung I_0 . Meistens wird I_0 als Bestrahlungsstärke und somit in W/m^2 angegeben. Da jedoch die Strahlung nach der Streuung als Strahldichte angegeben wird, wird die Gleichung noch durch den Raumwinkel geteilt. Da der Abstand für diese Betrachtung vorerst nicht ausschlaggebend ist kann der Raumwinkel konstant gewählt werden. Somit lässt sich die Strahldichte (mit $d\Omega = A_{proj}/r^2 = \text{konstant}$) wie folgt schreiben:

$$L_{scat}(\theta, \varphi) = \frac{I_0}{d\Omega} \cdot \frac{N_{ges}}{A_{ges}} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (f(a_i) \cdot A(a_i) \cdot Q_{sca}(a_i, \lambda_j) \cdot s(\lambda_j)) \cdot P(a_i, \lambda_j, \theta, \varphi). \quad (4.34)$$

Mit der Gleichung 4.34 kann nun die Strahldichte für eine bestimmte Partikelgrößenverteilung die sich auf dem Spiegel befindet und für ein bestimmtes Solarspektrum je nach Wetterbedingung berechnet werden. Dabei wird für jeden Partikelradius a und jede Wellenlänge λ eine Phasenfunktion berechnet. Nun kann über die Gleichung 4.13 bestimmt werden, welche Leistung durch Streuung auf die Kamera trifft:

$$\Phi_{px}^{scat} = \frac{1}{\cos(\alpha_{cam})} \int_{A_{PxCam}} \int_{\Omega_{px}} \left(\sum_{i=1}^{N_0} [1.00 \cdot L_{scat}(\theta_{sunI, camI}) + \right. \\ \rho_{mirr} \cdot L_{scat}(\theta_{sunI, camII}) + \\ \rho_{mirr} \cdot L_{scat}(\theta_{sunII, camI}) + \\ \left. \rho_{mirr}^2 \cdot L_{scat}(\theta_{sunII, camII}) \right] d\Omega dA. \quad (4.35)$$

4.2 Korrektur des Hintergrunds

Das Hintergrundbild muss pixelweise von dem Bild abgezogen werden, das sich in einem verschmutzten Punkt auf dem Spiegel spiegelt. Der verbleibende Teil des Pixelwertes wird durch Streuung an der Schmutzschicht verursacht. Aus diesem Beitrag kann die Sauberkeit abgeleitet werden. Bei der Erkennung der Verschmutzung auf einem Parabolspiegel kann der Hintergrund bzw. die gespiegelte Fläche eine Herausforderung darstellen. Die Grundidee, aus der Größe der RGB-Werte den Grad der Verschmutzung herzuleiten, wird durch einen inhomogenen Hintergrund deutlich erschwert. In Abbildung 4.13 - links ist ein Spiegel zu erkennen, der den Himmel reflektiert. Am Rand des Spiegels ist ein heller und in Richtung Mitte des Spiegels ein dunkler Blauton zu erkennen. Hierbei unterscheidet sich der RGB-Wert um fast 100 Zähler. Zusätzlich können noch verschiedene Wolken oder andere Spiegelungen die Messung der Verschmutzung erschweren.



ABBILDUNG 4.13: Aufnahmen eines Kollektors mithilfe einer Drohne. Im linken Bild ist die Spiegelung des Himmels im Kollektor zu erkennen. Da für die Verschmutzungsmessung ein homogener Hintergrund benötigt wird, wird wie im rechten Bild zu sehen der HCE-Reflex (gespiegelte Absorberrohre) für weitere Untersuchungen verwendet.

Um diese Schwierigkeiten zu vermeiden, wird nur der Bereich des HCE-Reflexionsbildes untersucht. Dies ist in Abbildung 4.13 - rechts zu erkennen. Da der HCE-Reflex sehr dunkel ist, trägt er nur einen vergleichsweise geringen Anteil zum RGB-Signal bei. Zusätzlich ist der Kontrast zwischen der dunklen Fläche des HCE-Reflex und der hellen Verschmutzung maximal und damit gut zu erkennen. Bei der Betrachtung des HCE-Reflexionsbildes zur Verschmutzungserkennung können die Kollektoren in einem Solarfeld nicht in Betrieb sein, da das Absorberrohr zu hell erscheint. In diesem Fall müssen doch Spiegelregionen analysiert werden, die nicht das reflektierte Bild des HCEs, sondern das des Himmels oder der Wolken zeigen. Der Hintergrundbeitrag wäre im Allgemeinen höher und inhomogener. Wenn diese Bereiche analysiert werden sollen, müsste der Hintergrund separat bestimmt werden, z.B. durch ein Himmelsluminanzmodell, wie in [33] beschrieben. Alternativ kann auch ein All-Sky-Imager auf Deutsch „Wolkenkamera“, wie in [32]

dargestellt, verwendet werden, um die Helligkeit des Himmels direkt zu messen und in die Auswertelgorithmen aufzunehmen. Die Beschränkung auf die Spiegelbereiche, in denen die direkte Reflexion der Röhre auftritt, ist nicht signifikant, da während eines Drohnenfluges eine große Anzahl von Bildern aufgenommen werden, die die meisten Blickwinkel abdecken. Durch die schon vorhandene Software QFly kann die Drohne so fliegen, dass alle zur Verschmutzungsbestimmung ausgewerteten Spiegelbereiche am Ort der Reflexion des Absorbers (Absorberreflex) liegen. Der Hintergrund trägt wie folgt zur Strahlungsleistung bei, wenn dieser auf ein Kamerapixel auftrifft:

$$\Phi_{\text{px}}^{\text{back}} = \rho_{\text{mirr}} \cdot \int_{A_{\text{PxCam}}} \int_{\Omega_{\text{px}}} L_{\text{back}} dA d\Omega, \quad (4.36)$$

wobei L_{back} die Strahldichtevertiefungsfunktion des Hintergrunds ist. A_{PxCam} ist die Fläche eines Pixels in der Ebene des Objekts und Ω_{px} ist der Raumwinkel, der durch die Kameraposition und die Fläche des Absorberrohres definiert ist. ρ_{mirr} ist der saubere Reflexionsgrad des Spiegels.

4.3 Kameraeigenschaften

In Abbildung 4.14 soll schematisch die Erstellung eines Bildes in JPEG-Format dargestellt werden. Es gibt mehrere Faktoren, die den Weg der Strahlung an die Linse bis zum digitalen Bildwert beeinflussen können. Dazu gehören die Blende und die Verschlusszeit. Diese beiden Faktoren sollen während einer Bildaufnahme konstant gehalten werden, um mögliche Beeinflussungen zu vermeiden und die Bilder untereinander vergleichbar zu machen. Als nächstes legt der Analog-Digital-Wandler (A/D) auf dem Abtastchip eine elektronische Verstärkung an, die normalerweise durch die ISO-Einstellung an der Kamera gesteuert wird. Während in der Theorie diese Verstärkung linear ist, können, wie bei jeder Elektronik, Nichtlinearitäten auftreten. Wenn vorerst Photonenrauschen, Chip-Rauschen, Verstärkerrauschen und Quantisierungsrauschen vernachlässigt werden, kann davon ausgegangen werden, dass die Zuordnung zwischen Strahlungsleistung und den in einer RAW-Kameradatei gespeicherten RGB-Werten in etwa linear ist [47]. Wenn die Bilder im gängigeren JPEG-Format gespeichert werden, führt der digitale Signalprozessor (engl: digital signal processor - DSP) der Kamera als nächstes die Demosaizierung von Bayer-Mustern durch, was ein weitgehend linearer (aber oft nicht stationärer) Prozess ist. Auch ein Schärfen wird in diesem Stadium oft angewendet. Anschließend werden die Farbwerte mit verschiedenen Konstanten multipliziert, um einen Weißabgleich durchzuführen. Schließlich wird eine Standard-Gamma-Funktion auf die Intensitäten in jedem Farbkanal angewendet, bevor sie in das JPEG-Format komprimiert werden [47].

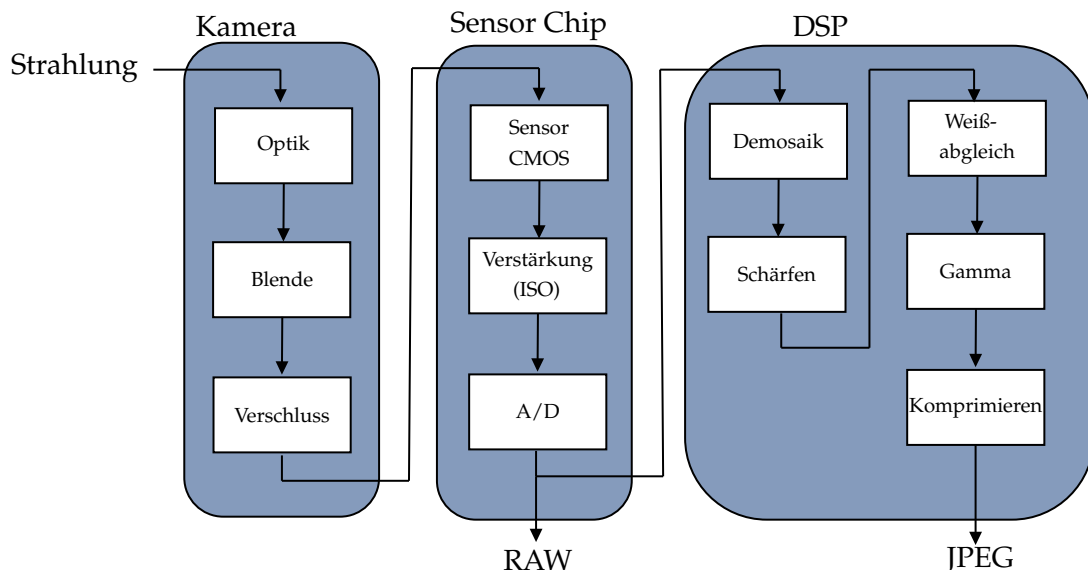
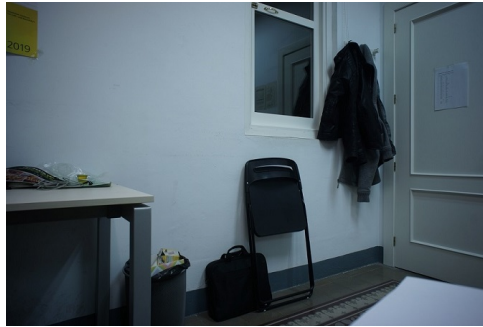


ABBILDUNG 4.14: Blockdiagramm mit den verschiedenen Rauschquellen sowie den typischen digitalen Nachbearbeitungsschritten [47].

Um die Verschmutzung auf einem Bild zu erkennen, müssen die Zuordnung zwischen einfallendem Licht und Pixelwert linear sein, wie es in der RAW-Kameradatei der Fall ist. Somit müssen alle Korrekturen vom digitalen Signalprozessor (DSP) rückgängig gemacht werden. Hierbei wird sich hauptsächlich auf den Weißabgleich und die Gamma-Korrektur konzentriert. Es wird auch noch kurz auf die Vignettierung eingegangen.

4.3.1 Weißabgleich

Bevor die erfassten RGB-Werte kodiert werden, führen die meisten Kameras eine Art Farbausgleich durch, um den Weißpunkt eines bestimmten Bildes näher an das reine Weiß (gleiche RGB-Werte) zu verschieben. Dabei wird die Kamera auf die Farbtemperatur des Lichtes am Aufnahmeort sensibilisiert. Wenn das Farbsystem und die Beleuchtung gleich sind, kann die Änderung minimal sein. Wenn das Leuchtmittel jedoch stark gefärbt ist, wie z.B. eine Glühlampe als Innenbeleuchtung (was in der Regel zu einem gelben oder orangefarbenen Farbton führt), kann die Kompensation recht bedeutend sein [44, 47]. Dies ist auch in Abbildung 4.15 zu erkennen. Hierbei wurde ein Büro bei Glühlampenbeleuchtung mit verschiedenen Farbtemperaturen aufgenommen. Bei einer sehr niedrigen Farbtemperatur wirkt das Bild eher blau und kalt. Bei einer hohen Farbtemperatur wirkt das Bild eher gelblich und warm. Viele Kameras haben einen automatischen Weißabgleich, wobei versucht wird, einen möglichst weißen Punkt automatisch zu erkennen und als Referenzpunkt zu verwenden [30].



Farbtemperatur: 3000 K
WB-RGB-Level: 1640/1024/2512



Farbtemperatur: 5500 K
WB-RGB-Level: 2680/1024/1432



Farbtemperatur: 6500 K
WB-RGB-Level: 2900/1024/1316



Farbtemperatur: 8000 K
WB-RGB-Level: 3204/1024/1188

ABBILDUNG 4.15: Das gleiche Bild wird mit unterschiedlichen Farbtemperaturen aufgenommen. Bei einer sehr niedrigen Farbtemperatur wirkt das Bild eher blau und kalt. Bei einer größeren Farbtemperatur wirkt das Bild eher gelblich und warm.

Um beim Erkennen der Verschmutzung auch mehrere Bilder untereinander zu vergleichen, sollte die Farbtemperatur in jedem Bild gleich sein. Nur so kann gewährleistet werden, dass es zu keinen durch unterschiedliche Weißabgleiche bedingten Artefakten im RGB-Wert kommt. Bei der Sony Nex 7 Kamera lässt sich dies über das WB-RGB-Level (White Balance RGB - Level) erkennen. Dieser gibt über ein Verhältnis wider, mit welcher Farbtemperatur das Bild bearbeitet wurde [27, 35].

4.3.2 Gamma Korrektur

Ein Problem bei der Aufnahme von Bildern ist der Unterschied zwischen der physikalischen und menschlichen Wahrnehmung. Die physikalische Wahrnehmung des Kamerasensors ist linear. Je mehr Licht auf die Kameralinse und damit auf den Kamerasensor trifft, desto höher ist die gemessene Helligkeit bzw. Spannung am Sensor. Dies soll in Abbildung 4.16 die blaue Linie darstellen. Die menschliche Wahrnehmung hingegen ist nicht linear. Im Vergleich zu einer Kamera ist das menschliche Auge viel empfindlicher für Veränderungen in dunklen Tönen als auf ähnliche Veränderungen in hellen Tönen. Diese Besonderheit hat einen biologischen Grund:

Sie ermöglicht es unserer Sehkraft, über einen größeren Leuchtdichtebereich zu arbeiten. Sonst wäre der typische Helligkeitsbereich, den wir im Freien antreffen, zu überwältigend. In Abbildung 4.16 wird diese Nichtlinearitäten über die rote Linie dargestellt. Schon bei einer geringen Helligkeit von 20% erscheint die Helligkeit für das Auge deutlich höher zu sein (fast 50%). Damit ein Bild für den Betrachter möglichst so aussieht, wie der Betrachter die Situation wahrgenommen hat, werden die Pixelwerte in einer Kamera mit einer Gamma-Funktion (siehe Gleichung 4.37) behandelt.

$$g(x) = f(x)^{1/\gamma} \quad (4.37)$$

Durch diese Gamma-Funktion geht die lineare Verbindung zwischen Strahlungsleistung und RGB-Wert verloren [9]. Für die Erkennung der Verschmutzung über Bilder mit behandelter Gamma-Funktion führt das nichtlineare Verhalten zu Verzerrungen. Aus diesem Grund wird versucht, die auf die Bilder angewendete Gamma-Funktion wieder aufzuheben. Dies geschieht mit der Umkehrfunktion der Gamma-Funktion (siehe Gleichung 4.38).

$$f(x) = g(x)^\gamma \quad (4.38)$$

Viele Hersteller von Kameras haben unterschiedliche Arten der Gamma-Funktion. Aus Gründen des Wettbewerbs werden diese Informationen nicht herausgegeben.

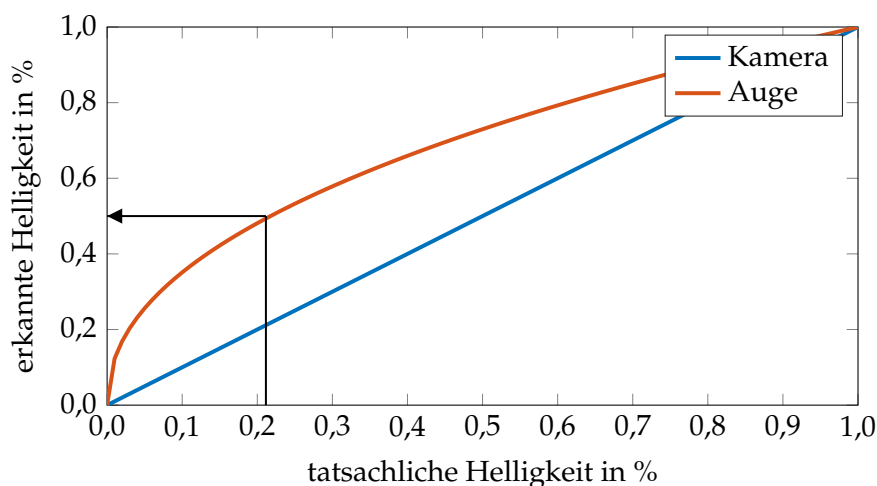


ABBILDUNG 4.16: Unterschied zwischen der physikalischen Wahrnehmung einer Kamera und der menschlichen Wahrnehmung eines Auges. Eine Kamera gibt die Helligkeitswerte linear wieder. Im Vergleich zu einer Kamera ist das menschliche Auge viel empfindlicher für Veränderungen in dunklen Tönen als auf ähnliche Veränderungen in hellen Tönen.

Um experimentell die Gamma-Funktion zu erhalten, wurde das gleiche Motiv mit unterschiedlichen Belichtungszeiten fotografiert. Ein Teil der Bilder mit den entsprechenden Belichtungszeiten sind in Abbildung 4.17 dargestellt. Je größer die Belichtungszeit, desto mehr Licht trifft auf die Linse und das Bild wird entsprechend heller. Bei einer Kamera, die keine Gammakorrektur vornimmt, ergibt sich ein lineares Verhalten zwischen Belichtungszeit und RGB-Wert eines Pixels. Dies wurde in verschiedenen Veröffentlichungen untersucht [3, 17, 53].

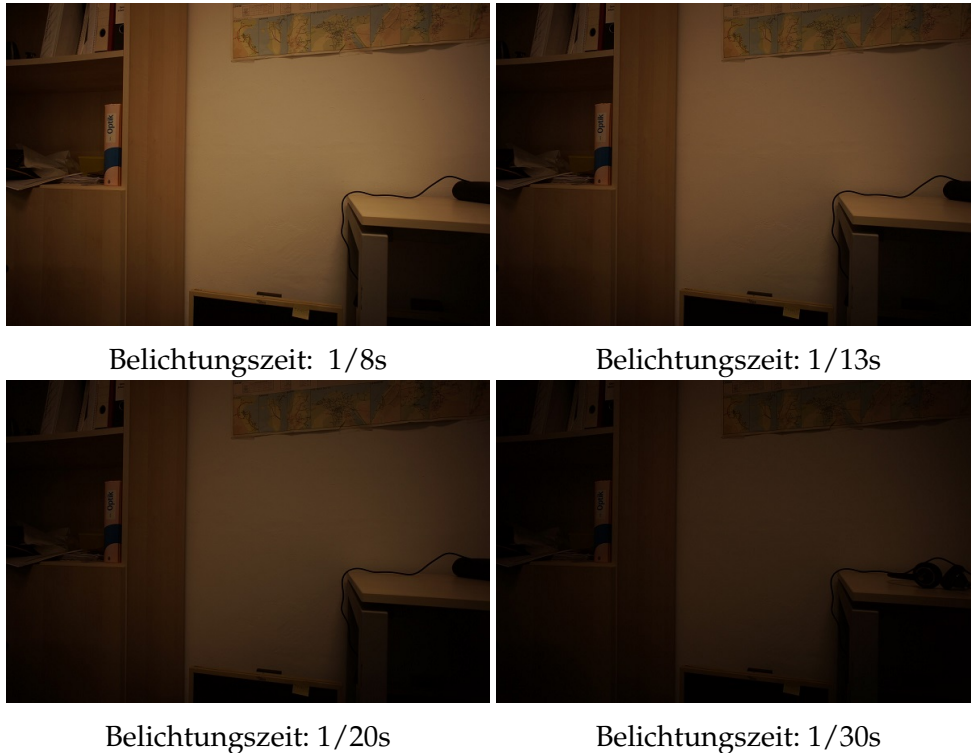


ABBILDUNG 4.17: Aufnahme des gleichen Motivs mit unterschiedlichen Belichtungszeiten. Dadurch soll experimentell die Gammafunktion der verwendeten Kamera berechnet werden.

Aufgrund dieses Wissens kann über die Variation der Belichtungszeit die Gammafunktion experimentell bestimmt werden. In Abbildung 4.18 sind nun der Durchschnitt über mehrere Pixelwerte der weißen Wand über die Belichtungszeit aufgetragen. Es ist deutlich die Gamma-Funktion zu erkennen, welche als Korrektur für zukünftige Bilder verwendet werden kann.

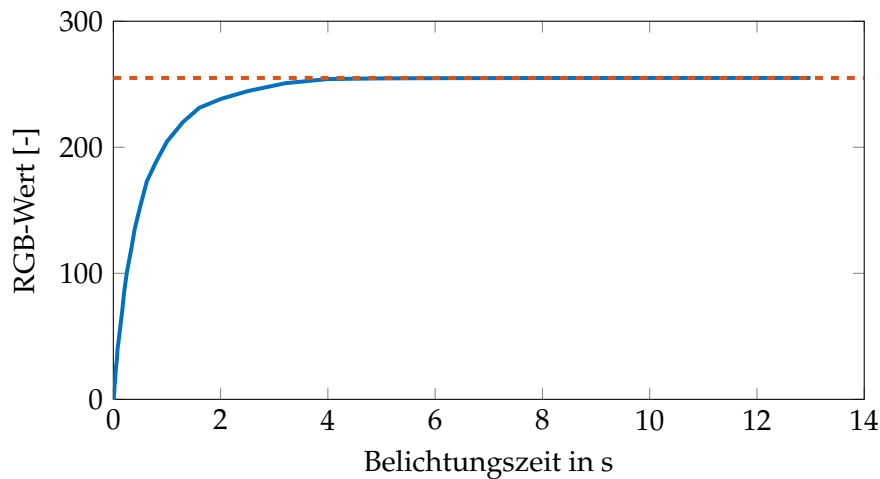


ABBILDUNG 4.18: Durch die Aufnahme von Bildern mit unterschiedlicher Belichtungszeit kann experimentell die Gammafunktion berechnet werden. Dabei werden die RGB-Werte zu unterschiedlichen Belichtungszeiten aufgetragen. Die Gammafunktion ist deutlich zu erkennen. Die inverse Gammafunktion kann als Korrektur für zukünftige Bilder dienen.

4.3.3 Vignettierung

Das an der Kamerafront angebrachte Objektiv führt zu einem starken Verdunkelungseffekt an den Rändern des Bildes, der als Vignettierung bezeichnet wird. Der Vignettierungseffekt bezieht sich auf einen positionsabhängigen Lichtverlust in der Leistung eines optischen Systems, der hauptsächlich auf die Blockade eines Teils des einfallenden Strahlenbündels durch die effektive Größe des Blendenstopps zurückzuführen ist. Durch diesen Lichtverlust ergibt sich eine allmähliche Ausblendung eines Bildes an Punkten in der Nähe seines Umfangs [47]. Dieses Phänomen soll in Abbildung 4.19 dargestellt werden. Im linken Bild wurde mit der Kamera ein weißer Hintergrund fotografiert. Deutlich zu erkennen sind die dunklen Ecken am Rand des Bildes. Um nun eine Aussage zu treffen, wie groß der Einfluss der Vignettierung ist, werden im rechten Bild die RGB-Werte in einer Farbskala aufgetragen.

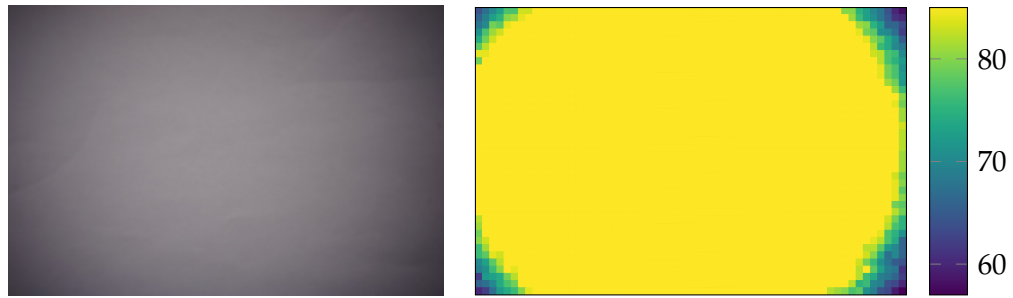


ABBILDUNG 4.19: Einfluss der Vignettierung: Im linken Bild wurde mit der Kamera ein weißer Hintergrund fotografiert. Die abgedunkelten Ecken sind deutlich zu erkennen. Im rechten Bild sind die RGB-Werte in einer Farbskala aufgetragen. Auf das zentrale Bild hat die Vignettierung kaum eine Auswirkung.

Der Unterschied zwischen einer Ecke des Bildes und der Mitte liegt bei fast 25 RGB-Zählern. Jedoch begrenzt sich diese Differenz auf eine kleine Fläche in Richtung der Ecken. In der zentrale Fläche, in Abbildung 4.19 - rechts deutlich als gelbe Fläche zu erkennen, sind die Unterschiede unerheblich klein. Daher wird die Vignettierung in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Experiment

Während einer QFly-Messung auf der PSA (span: Plataforma Solar de Almería) wurde ein Datensatz für die Untersuchung der vorgestellten Methode erfasst. Dabei wurde auf einer Drohne die Kamera Sony Nex 7 befestigt und bei einem Messungsflug wurden Bilder aufgenommen.

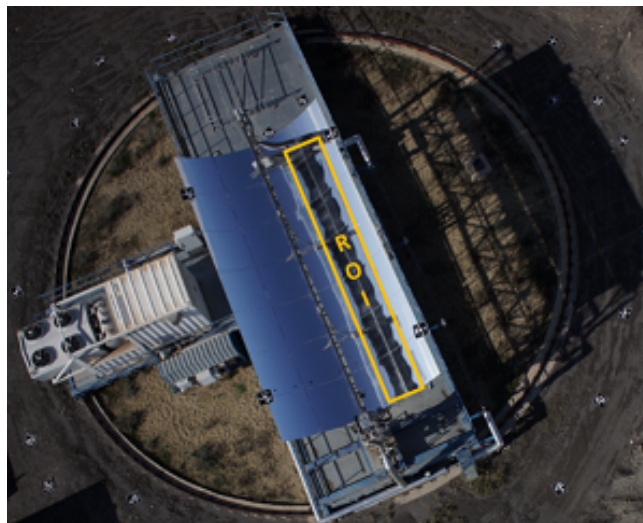


ABBILDUNG 5.1: Eines der Rohbilder, wie sie mit dem UAV aufgenommen wurden. Für die Datenauswertung werden nur Punkte innerhalb des Bereichs des direkten Reflexes des HCE verwendet, der durch das orangefarbene Rechteck ("ROI") gekennzeichnet ist.

Der KONTAS-Kollektor [23] ist ein alleinstehender Kollektor auf der Plataforma Solar de Almería (siehe Abbildung 5.1). Die Spiegelfacetten wurden vor den Messungen für acht Wochen den Witterungen ausgesetzt. An einem sonnigen Tag mit einigen Zirkuswolken wurde ein UAV-Flug durchgeführt, bei dem der Kollektor während des Fluges (zehn minütige Spiralroute über dem Kollektor) aus verschiedenen Winkeln fotografiert wurde. Die Flugroute der Drohne und der Zeitpunkt der Aufnahme wird zuvor über ein Programm bestimmt und kann für zukünftige Flüge

angepasst werden. Über sogenannte Targets (in Abbildung 5.1 als schwarz weißes Ziel zu erkennen) kann später die Position des Kollektor in einem dreidimensionalen Raum bestimmt werden. Zusätzlich wird während des Fluges die Position der Drohne und damit der Kamera zu jeder Aufnahme abgespeichert. Aus diesen Informationen (Position des Kollektors, Position der Kamera, Stand der Sonne und bekannter Partikelgrößenverteilung und Solarspektrum) kann nach dem Flug über die Gleichungen 4.34 und 4.35 aus Kapitel 4 für jede Position auf dem Spiegel ein Streufaktor bestimmt werden. Zusätzlich kann über die Targets ein sogenanntes „Orthobild“ berechnet werden. Dieses wird automatisch aus jedem Bild erstellt und gibt ein vollständiges Bild des Kollektors entzerrt wieder (siehe Abbildung 5.2).

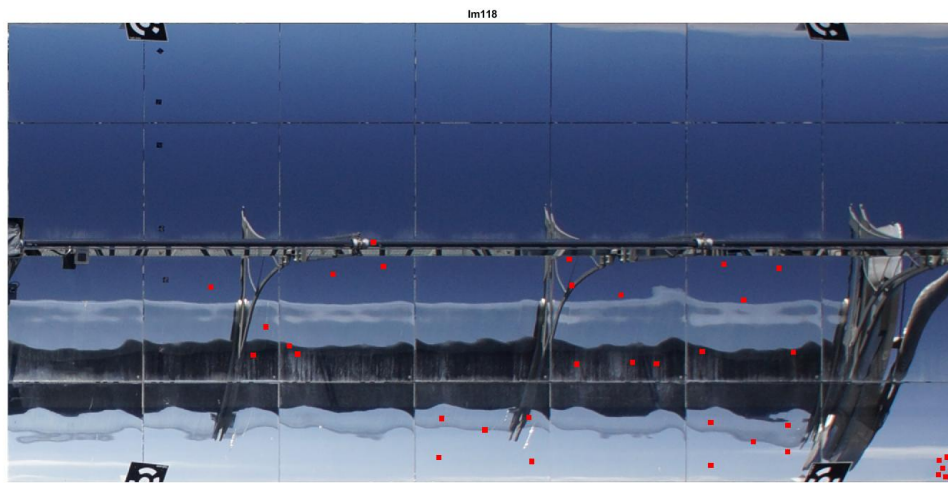


ABBILDUNG 5.2: Ein vollständiges entzerrtes Bild des Kollektors (Orthobild) mit rotmarkierten Referenzreflexionsmesspunkten.

Nach dem UAV-Flug wurden Referenzreflexionsmessungen mit einem Devices & Services R15 Handreflexionsmessgerät [45] an 35 Stellen durchgeführt, die über die untere Hälfte der Kollektorfläche verteilt waren. Diese Referenzmessungen werden im „Orthobild“ in der Abbildung 5.2 als rote Punkte gekennzeichnet. Die Reflexionsmessungen wurden registriert und der Ort der Messung auf dem Spiegel ermittelt. Die Genauigkeit der Messstelle kann auf 3 - 5 cm geschätzt werden. Das hier verwendete Handreflektometer hat eine Messgenauigkeit von rund 2 % [11]. In einem ersten Bewertungsansatz wurden nur die Messpunkte in den Bereichen des Spiegels berücksichtigt, in denen das schwarze Absorberrohr reflektiert wird. Ein Rohbild und die interessante Region (engl: region of interest - ROI) sind in Abbildung 5.1 sowie im „Orthobild“ in Abbildung 5.2 schematisch dargestellt. Die Rohdaten der UAV-Bilder werden dann von Teilen des QFly-Softwarepakets verarbeitet. Zuerst wird eine Orthogonalisierung durchgeführt. Der Bereich der direkten HCE-Reflexion wird automatisch aus dem vorhandenen QFly-Softwarepaket zusammen mit dem Standort der Drohne, der Position und Ausrichtung der Kollektorfläche,

der HCE-Position und dem Sonnenstand abgeleitet. Die Positionen der Referenzmessungen werden dann zur Auswertung auf den Orthobildern abgebildet. An diesen Messpunkten werden die RGB-Zahlen des Bildes kanalweise über eine Fläche von 5×5 Pixel (ca. $2 \times 2 \text{ cm}^2$ auf dem Spiegel) gemittelt und zusammen mit dem entsprechenden Reflexionsgrad für jedes Bild gespeichert.

Ergebnisse

Im Abschnitt Ergebnisse sollen die Bilder aus dem Experiment ausgewertet werden. Dabei werden die Methoden aus Abschnitt 4 zur Hilfe genommen.

6.1 Angewandte Korrekturen

Um in den aufgenommenen Bildern die Verschmutzung zu isolieren werden verschiedene Korrekturen angewandt. Zuerst werden alle Faktoren der Kamera betrachtet. Somit wird zunächst das Bild der Gamma-Korrektur unterzogen. Über die Abbildung 4.18 lässt sich die inverse Gamma-Funktion $f(x) = 0,8835x^{2,4}$ der Sony Nex7 Kamera bestimmen. Mit dieser inversen Gamma-Funktion wird jeder Pixelwert eines Bildes korrigiert. Somit wird die kameraeigenen Gamma-Funktion aufgehoben und es entsteht ein linearer Zusammenhang zwischen Beleuchtungsintensität und RGB-Wert, was für die Auswertung und für den Vergleich der unterschiedlichen Bilder unerlässlich ist. Da alle in dem Versuch aufgenommenen Bilder einen ähnliches WB-RGB-Level (Abweichung kleiner als 0,1 %) besitzen, kann der Weißabgleich als konstant angesehen werden. Aufgrund des geringen Unterschieds bedarf es beim Weißabgleich keiner weiteren Korrektur. Auch durch die Vignettierung wird nur der Rand des Bildes beeinflusst. Da der aufgenommene Kollektor sich meistens zentral in der Mitte des Bildes befindet, wird auch die Vignettierung als vernachlässigbarer Faktor behandelt.

Wie in Kapitel 4 beschrieben setzt sich der Kamera-RGB-Wert Cam_{px} aus folgenden Werten zusammen:

$$Cam_{px} = \left(\Phi_{px}^{back} + \Phi_{px}^{scat} + \Phi_{px}^{diffuse} \right) \cdot Cam_{px}^{corr} \quad (6.1)$$

Der Faktor Φ_{px}^{scat} entsteht durch Streuung an der Verschmutzung. Um den Anteil zu bestimmen, wie viel Streulicht in die Kamera fällt, wird zunächst die Strahldichteverteilung L_{scat} mithilfe der Gleichung 4.34 berechnet. Hierbei wird die Partikelverteilung von Roth [39] aus Abbildung 3.2 und das Sonnenspektrum mit einer AOD =

0,084 und einer $AM = 1,5$ aus Abbildung 3.3 verwendet. Die Abbildung 6.1 zeigt die Strahldichteverteilung in einem Polarplot mit logarithmischer Skala. Je nach Winkel ergibt sich ein anderer Faktor für die Streuungskorrektur.

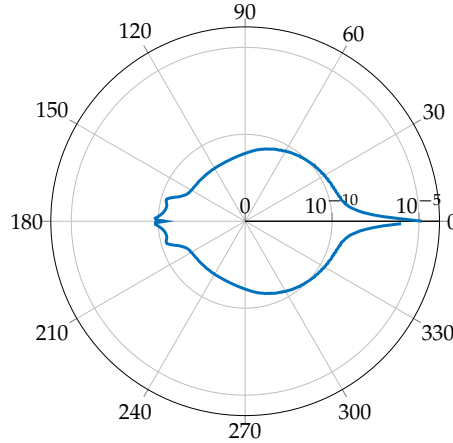


ABBILDUNG 6.1: Simulation der gestreuten Strahldichteverteilung L_{scat} berechnet mit Gleichung 4.34 für die Partikelgrößenverteilungen von Roth [39] und einem Solarspektrum von $AOD = 0,084$ und $AM = 1,5$. Die Strahldichteverteilung ist in einem Polarplot mit logarithmischer Skala dargestellt.

Für jeden Punkt auf dem Spiegel wird eine Streukorrektur Φ_{px}^{scat} berechnet. Diese Streukorrektur setzt sich aus vier Komponenten, die in Gleichung 4.35 beschrieben sind, zusammen. In Abbildung 6.2 ist schematisch die Streuung an einem Partikel dargestellt. Die Strahldichteverteilung L_{scat} ist blau eingezeichnet. Für den RGB-Wert des Bildes ist nun entscheidend, welcher Anteil des Streulichts in die Kamera fällt. Aus diesem Grund werden aus der Strahldichteverteilung L_{scat} die Strahlungsleistung in Richtung des Winkels θ (oranger Bereich) berechnet. In Abbildung 6.2 wird nur die Streuung vor der Reflexion (Streuung beim ersten Durchgang von Strahlung durch die Schmutzschicht) gezeigt. Das gleiche Vorgehen wird auch bei der Streuung nach der Reflexion (Streuung beim zweiten Durchgang von Strahlung durch die Verschmutzungsschicht), wie in Abbildung 4.6 dargestellt, verwendet. Dabei wird die Strahlung der Sonne erst vom Spiegel reflektiert und danach von einem Partikel gestreut. Mithilfe der Gleichung 4.35 kann anschließend für jede Position der Kamera und für jedes Pixel im Bild die Streukorrektur Φ_{px}^{scat} bestimmt werden.

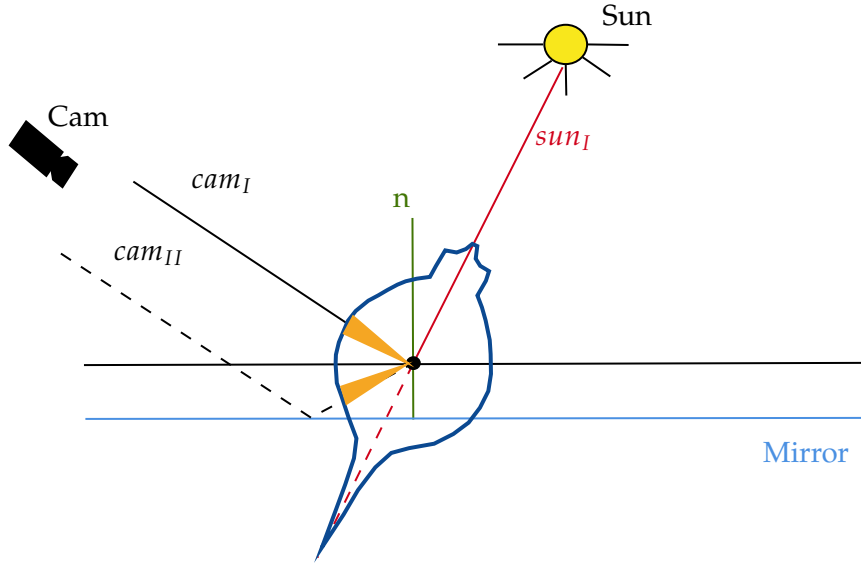


ABBILDUNG 6.2: In blau wird die Strahldichtevertellung L_{scat} aus Abbildung 6.1 dargestellt, wobei die x-Achse in Richtung der Sonne rotiert und die Strahldichtevertellung in Polarkoordinaten mit dem Mittelpunkt am Streuzentrum platziert ist. Je nach Position der Kamera und Bereich des Spiegels ändert sich die Streuung (orange Fläche) in die Kamera. Der Öffnungswinkel der orangenen Fläche ergibt sich aus der Ausdehnung eines Pixels auf dem Kamerachip und der Entfernung zur Kamera. Somit hat jedes Bild für jedes Pixel eine unterschiedliche Streukorrektur [eigene Abbildung].

Als Hintergrund werden immer nur Messpunkte genommen, die sich innerhalb des Absorberreflexes befinden. Durch den dunklen Hintergrund ist der Beitrag zum RGB-Wert sehr gering, weshalb der Faktor Φ_{px}^{back} vernachlässigt werden kann. Durch klare und sonnige Wetterbedingungen bei dem Experiment kann auch die diffuse Strahlung mit dem Faktor $\Phi_{px}^{diffuse}$ vernachlässigt werden. Durch die Vernachlässigung von Φ_{px}^{back} und $\Phi_{px}^{diffuse}$ kann die Gleichung 6.1 folgendermaßen vereinfacht werden:

$$Cam_{px} = \Phi_{px}^{scat} \cdot Cam_{px}^{corr}. \quad (6.2)$$

Da nun die Verschmutzung aus den Bildern erkannt werden soll, muss die Gleichung 6.2 nach Cam_{px}^{corr} umgestellt werden:

$$Cam_{px}^{corr} = \frac{Cam_{px}}{\Phi_{px}^{scat}}. \quad (6.3)$$

Cam_{px}^{corr} soll dabei den korrigierten RGB Wert darstellen, der die Pixel in verschiedenen Bildern vergleichbar macht. Im Folgenden werden die Messpunkte ausgewertet, zu denen es auch eine Referenzreflexionsmessung gibt. Dabei werden die RGB-Werte im ursprünglichen Zustand Cam_{px} als auch im korrigierten Zustand Cam_{px}^{corr}

verglichen. Da in diesem Experiment immer derselbe Kollektor aufgenommen wurde, müssen die gleichen Messpunkte aus unterschiedlichen Bildern nach der Korrektur auch den gleichen Cam_{px}^{corr} - Wert besitzen.

Um statistische Aussagen treffen zu können wird in der folgenden Auswertung der Ergebnisse der quadratische Mittelwertfehler (root mean square error - RMSE) berechnet. Der RMSE gibt an, wie gut eine Funktionskurve an vorliegende Daten angepasst ist, beziehungsweise wie stark eine Prognose im Durchschnitt von den (historischen) Daten bzw. tatsächlichen Beobachtungswerten abweicht. y_i stellt dabei den i -ten Wert der vorliegenden Daten und \hat{y}_i den vorhergesagten i -ten Wert bei gegebenem Modell dar. Somit lässt sich der RMSE berechnen über die Formel:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}. \quad (6.4)$$

Der normalisierte mittlere quadratische Fehler (normalized root mean square error - NRMSE) erleichtert den Vergleich zwischen Datensätzen oder Modellen mit unterschiedlichen Maßstäben. Dadurch können RGB-Werte vor und nach der Korrektur miteinander verglichen werden. Der NRMSE lässt sich berechnen über die Formel

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{y}}, \quad (6.5)$$

dabei stellt \bar{y} den Mittelwert über den vorliegenden Daten dar. Bei linearen Regressionen wird zusätzlich zum NRMSE auch das R^2 berechnet:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}. \quad (6.6)$$

Es spiegelt das Quadrat der Korrelation zwischen den Ergebnissen und den vorhergesagten Ergebnissen wieder.

6.2 Auswertung von Punkten mit Reflektionswert

Mittels der Referenzmessung auf dem Spiegel lassen sich nun die RGB-Werte mit der entsprechenden Reflektivität vergleichen. In Abbildung 6.3 werden keine Korrekturen an den RGB-Werten vorgenommen und Cam_{px} dargestellt. Es ist ein linearer Zusammenhang zwischen der Reflektivität und dem RGB-Wert zu erkennen. Je größer der RGB-Wert eines Pixels ist, desto kleiner ist die Reflektivität und desto größer die Verschmutzung. Die Anzahl der Punkte ist sehr gering, was an den wenigen Referenzmessungspunkten liegt, die im Bild Im118 (siehe Abbildung 5.2 rote Punkte) im Absorberreflex liegen. Durch die geringe Anzahl an Messpunkten ist eine statistische Auswertung nur wenig aussagekräftig. Der NRMSE liegt bei 1,606 und das R^2 liegt bei 0,91, wodurch der lineare Zusammenhang nochmals bestätigt

wird. Die Abbildung 6.3 ist stellvertretend für andere Bilder, bei denen ein ähnlich deutlicher linearer Zusammenhang zu erkennen ist.

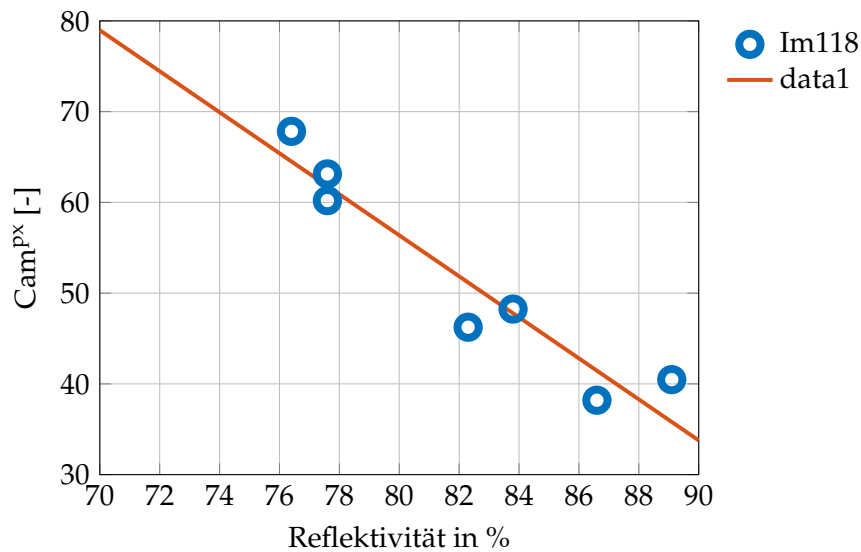


ABBILDUNG 6.3: Unkorrigierter RGB-Wert aufgetragen gegen die Reflektivität an den Stellen der Referenzmessungen. Dabei werden die Messpunkte ausgewertet, die sich im Bild Im118 (siehe Abbildung 5.2) innerhalb des Absorberreflexes befinden und es eine Referenzmessung der Reflektivität gibt.

In der Abbildung 6.4 sind alle Messpunkte des Bildes mit dem Streufaktor Φ_{px}^{scat} korrigiert und als Cam_{px}^{corr} dargestellt. Durch die Korrektur werden die Punkte etwas auseinandergerissen, was sich auch in der Statistik niederschlägt. Der NRMSE liegt bei 3,165 und das R^2 liegt bei 0,65. Da es sich hierbei aber nur um eine sehr geringe Stichprobenanzahl handelt, ist die statistische Aussagekraft zu prüfen. Optisch lässt sich aber auch in Abbildung 6.4 die Linearität zwischen der Reflektivität und dem korrigiertem RGB-Wert des Bildes erkennen. Bei dieser Untersuchung wurden die Messpunkte eines Bildes betrachtet. Sobald ein großes Solarfeld untersucht werden soll, müssen verschiedene Bilder mit unterschiedlicher Kamera-Sonnen-Konstellation vergleichbar sein. Aus diesem Grund werden nun unterschiedliche Bilder des gleichen Kollektors betrachtet (siehe Anhang B). Auch in diesem Fall werden wieder nur Messwerte betrachtet, die sich innerhalb des Absorberreflexes befinden.

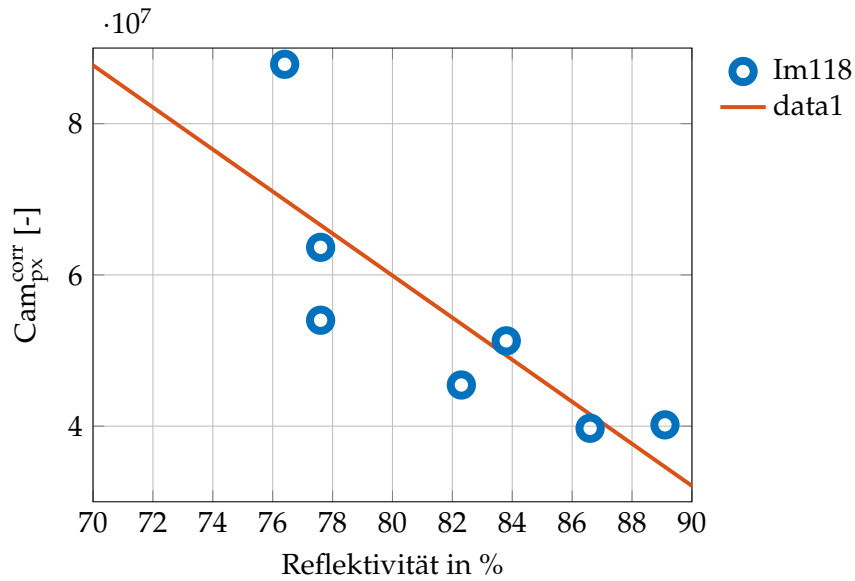


ABBILDUNG 6.4: Korrigierter RGB-Wert aufgetragen gegen die Reflektivität an den Stellen der Referenzmessungen. Dabei werden die Messpunkte ausgewertet, die sich im Bild Im118 (siehe Abbildung 5.2) innerhalb des Absorberreflexes befinden und es eine Referenzmessung der Reflektivität gibt. Bei der Darstellung ist jeder Messpunkt des Bildes mit dem entsprechenden Streufaktor Φ_{px}^{scat} korrigiert.

Der im Versuch aufgenommene Kollektor ist immer der gleiche und durch die Erstellung der Orthobilder lässt sich immer dieselbe Position auf dem Kollektor auswerten. Die Referenzmessung der Reflektivität kann auf verschiedene Bilder übertragen werden. In Abbildung 6.5 sind mehrere Bilder an den Referenzpunkten ausgewertet worden. Jedes Bild wird durch eine eigene Farbe dargestellt. Es ist zu erkennen, dass jedes Bild für sich alleine einen linearen Zusammenhang zwischen Reflektivität und RGB-Wert Cam_{px} wiedergibt. Durch paralleles Verschieben (nach oben oder nach unten) der Regressionskurve ist jede Farbe linear. Werden die Punkte als Gesamtes betrachtet, lässt sich kein linearer Zusammenhang erkennen. Der NRMSE liegt bei 4,531 und das R^2 liegt bei 0,04. Schon in Abbildung 6.5 wird deutlich, dass bei den Bildern Im087, Im172 und Im264 die RGB-Werte deutlich höher sind als bei den restlichen Bildern. Dies liegt daran, dass der Sonnenreflex innerhalb des Spiegels liegt, wodurch die Bilder sehr stark belichtet werden (siehe Anhang B). Durch die starke Belichtung grenzt sich die Verschmutzung deutlich ab und ist optisch sehr gut zu erkennen.

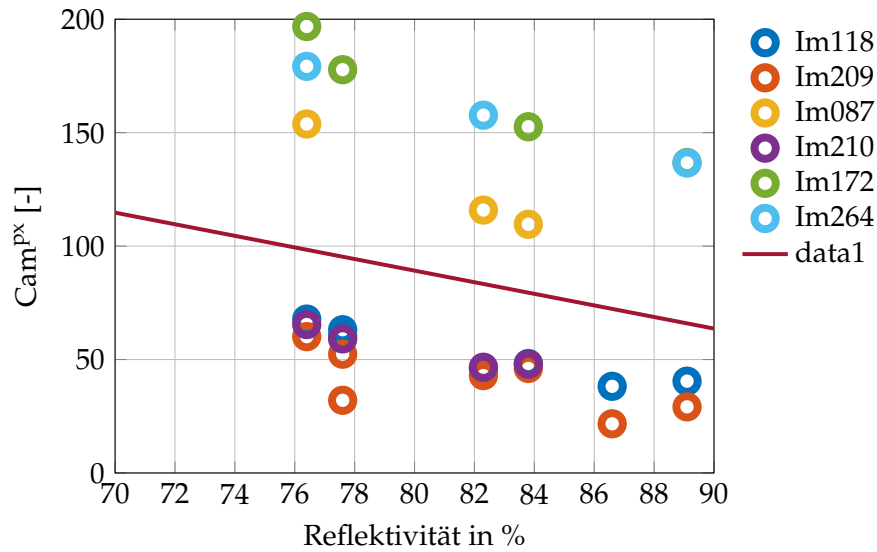


ABBILDUNG 6.5: Unkorrigierter RGB-Wert aufgetragen gegen die Reflektivität an den Stellen der Referenzmessungen für unterschiedliche Bilder. Dabei werden die Messpunkte ausgewertet, die sich innerhalb des Absorberreflexes befinden und es eine Referenzmessung der Reflektivität gibt.

Theoretisch sollten alle RGB-Werte, die das gleiche Pixel im Bild darstellen nach den Korrekturen denselben Wert annehmen. Dies ergibt sich daraus, dass sich die Reflektivität an diesem Punkt nicht ändert. Da sich jedoch die Position der Kamera und damit der Blickwinkel ändert, sind die Bilder unterschiedlich in ihrer Helligkeit bzw. in ihren RGB-Werten. Werden nun alle Pixelwerte der unterschiedlichen Bilder mit dem Streufaktor $\Phi_{\text{px}}^{\text{scat}}$ korrigiert, nähern sich die Punkte an. (siehe Abbildung 6.6). Es lässt sich jedoch nur ein schwacher globaler linearer Zusammenhang erkennen, da auch der RMSE mit 4,26 und der R^2 mit 0,15 nicht aussagekräftig sind. Die Linearität gilt auch nach der Korrektur für einzelne Bilder.

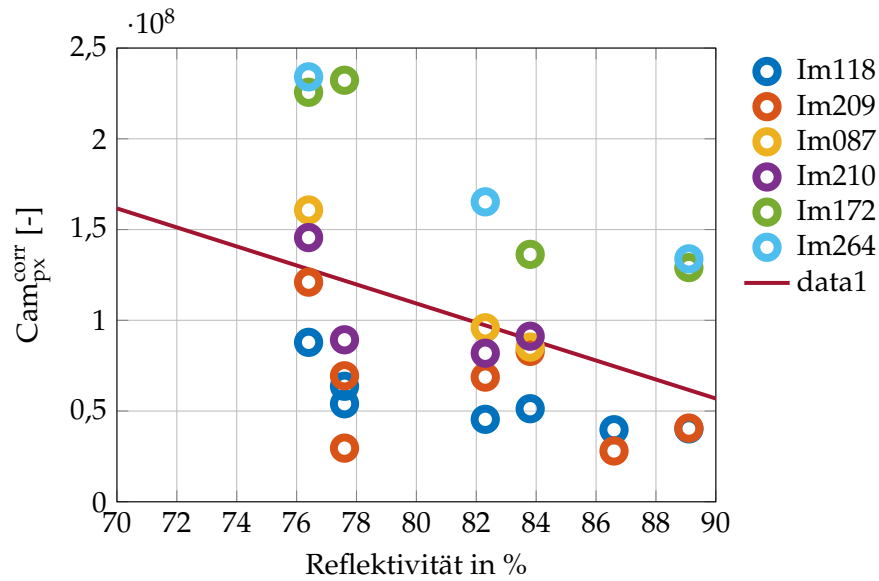


ABBILDUNG 6.6: Korrigierter RGB-Wert aufgetragen gegen die Reflektivität an den Stellen der Referenzmessungen. Dabei werden die Messpunkte ausgewertet, die sich innerhalb des Absorberreflexes befinden und für die es eine Referenzmessung der Reflektivität gibt. Bei der Darstellung ist jeder Messpunkt eines Bildes mit dem entsprechenden Streufaktor $\Phi_{\text{px}}^{\text{scat}}$ korrigiert.

6.3 Auswertung beliebiger Punkte

Die Auswertung über die Referenzpunkte gestaltet sich sehr schwierig, da es nur wenige Messpunkten gibt, die innerhalb eines Bildes im Bereich des Absorberreflexes liegen. Durch die geringe Anzahl an Messpunkten kann keine statistisch verwertbare Aussage getroffen werden. Zusätzlich können auch Fehler bei der Messung der Referenzpunkte bzw. bei der Eingrenzung der Position entstanden sein, wodurch die Auswertung deutlich erschwert wird. Um aus der Messkampagne weitere Informationen zu bekommen und vielleicht auch neue Ansätze zu erschließen, wurden beliebige Punkte innerhalb des Absorberreflexes untersucht. Um zu zeigen, dass die Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen RGB-Wert und Reflektivität weiter besteht, wurden in Abbildung 6.7 die RGB-Werte als rote Linie grafisch dargestellt. Das in Abbildung 6.7 eingefügte obere Bild soll als Vergleich dienen. Sowohl im Bild als auch im Grafen, lässt sich eine optische Übereinstimmung zwischen Verschmutzung und RGB-Wert erkennen. Dabei kann die Verschmutzung mit dem bloßen Auge abgeschätzt werden, jedoch handelt es sich nicht um eine quantifizierbare Größe. Als Beispiel ist bei der Pixelnummer 600 ein Anstieg der Helligkeitswerte zu erkennen, welche mit der Verschmutzung im Bild übereinstimmt.

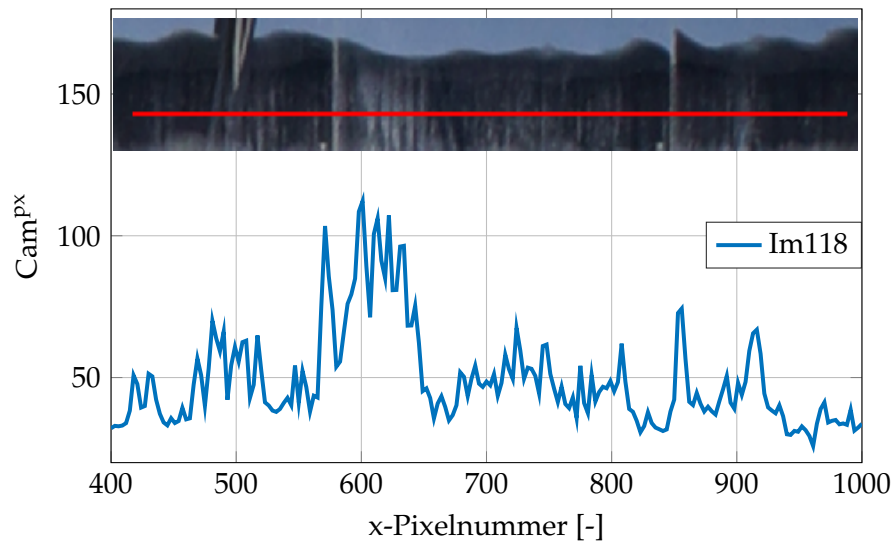


ABBILDUNG 6.7: Durch einen optischen Vergleich zwischen dem Bild und dem RGB-Wert soll der Zusammenhang zwischen Reflektivität und Helligkeit gezeigt werden. Auf der x-Achse sind die einzelnen Pixel nummeriert dargestellt. Die RGB-Werte, die unter der roten Linie befindlichen Bildpunkte sind auf der y-Achse dargestellt und stimmen zumindest optisch mit der Reflektivität bzw. aus ihrem Erscheinungsbild geschätzten Verschmutzung überein.

Die in Abbildung 6.7 gezeigte rote Linie wird im weiteren Verlauf in verschiedenen Bildern analysiert und untereinander verglichen. Die Position der roten Linie ist dank der Entzerrung durch das Orthobild für alle Bilder gleich. Da sich die Verschmutzung auf dem Kollektor nicht ändert, sollten auch hier die Linien des RGB-Wertes für alle Bilder übereinstimmen.

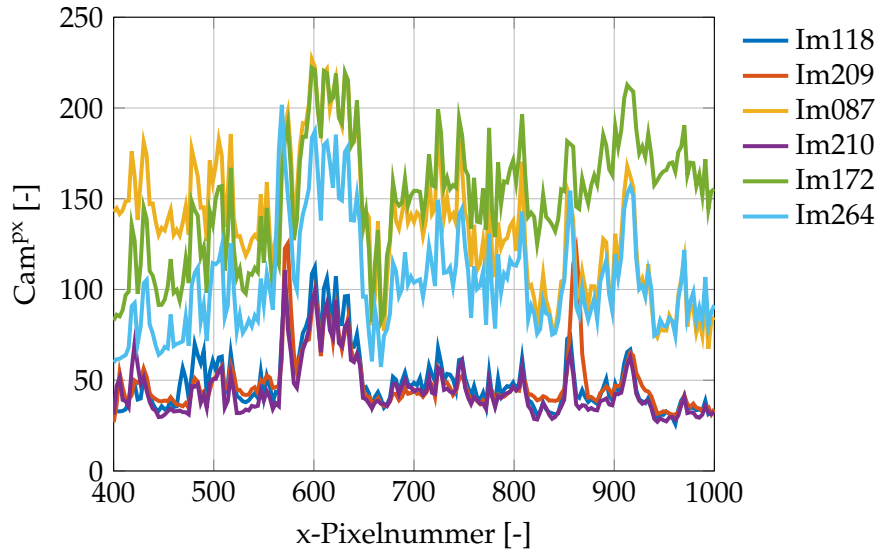


ABBILDUNG 6.8: RGB-Werte im Absorberreflex aufgetragen gegen die x-Koordinate der Pixel unter der roten Linie für unterschiedliche Bilder. Dabei werden in jedem Bild dieselbe Position ausgewertet (sieh rote Linie im Anhang B). Bei der Darstellung sind keine Korrekturen angewendet worden.

In Abbildung 6.8 werden die Unterschiede der Bilder sehr deutlich. Da die Bilder Im087, Im172 und Im264 von einer deutlich abweichenden Kameraposition aufgenommen wurden, wodurch der Sonnenreflex sich innerhalb des Spiegels befindet, sind die Bilder überbelichtet was zu hohen RGB-Werten führt. An den Bildern Im087, Im172 und Im264 ist zusätzlich gut zu erkennen, dass die Sichtbarkeit der Verschmutzung deutlicher wird, wenn die Bilder stark beleuchtet sind. Die Ausschläge zwischen Sauber und Verschmutzt werden deutlich größer als bei den Bildern Im118, Im209 und Im210. Die deutlichen Unterschiede der Bilder zeigen sich auch in den statistischen Werten aus Tabelle 6.1. Da bei dieser Auswertung keine Regression gemacht werden kann, wird der NRMSE auf die Messpunkte des ersten Bildes bezogen und wie folgt berechnet:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^{Im118})^2}, \quad (6.7)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{y}}. \quad (6.8)$$

Der im Versuch aufgenommene Kollektor ist immer der gleiche und durch die Erstellung der Orthobilder lässt sich immer dieselbe Position auf dem Kollektor auswerten. Somit sollte ein Pixel von unterschiedlichen Bildern, welches aber dieselbe Spiegelstelle abbildet, den gleichen korrigierten RGB-Wert haben. Über die Abweichung von unterschiedlichen Bildern zum Bild Im118 kann so eine Aussage über die

statistische Relevanz der Berechnung getroffen werden. Aus diesem Grund ist der RMSE für das erste Bild immer Null. Besonders die stark belichteten Bilder Im087, Im172 und Im264 weichen vom ersten Bild ab.

TABELLE 6.1: NRMSE über die Differenz der RGB-Werte eines Bildes zu denjenigen im Bild Im118. Bei den entsprechenden Messpunkten wurde keine Korrektur vorgenommen.

	Im118	Im209	Im087	Im210	Im172	Im264
NRMSE - no corr	0	0,60	9,65	0,37	11,98	4,98

In Abbildung 6.9 werden alle Pixel der roten Linie mit dem entsprechenden Streufaktor $\Phi_{\text{px}}^{\text{scat}}$ korrigiert und als $\text{Cam}_{\text{px}}^{\text{corr}}$ dargestellt. Die stark belichteten Bilder Im087, Im172 und Im264 rücken deutlich weiter nach unten. Zwischen der Pixelnummer 400 und 500 ist der Unterschied von Bild Im087 größer als beim Rest der Bilder. Dies hängt damit zusammen, dass die untersuchte Pixellinie sehr nah an den Sonnenreflex kommt (vergleiche Anhang B), wodurch sich ein Streuwinkel kleiner 15° ergibt. In diesem Bereich des Streuwinkels, ändern sich der Streufaktor $\Phi_{\text{px}}^{\text{scat}}$ sehr stark mit kleinen Winkeländerungen (siehe Abbildung 6.1). Die gleiche Problematik entsteht bei Bild Im172 zwischen der Pixelnummer 700 und 1000. Auch hier ist die Korrektur, welche aus der Streufunktion aus Abbildung 6.1 hervorgeht, nicht groß genug. Zudem wird auch hier deutlich, dass die verschmutzten Pixel bei stark belichteten Bildern wie Im087, Im172 und Im264 deutlicher ausreißen als bei den Bildern Im118, Im209 und Im210.

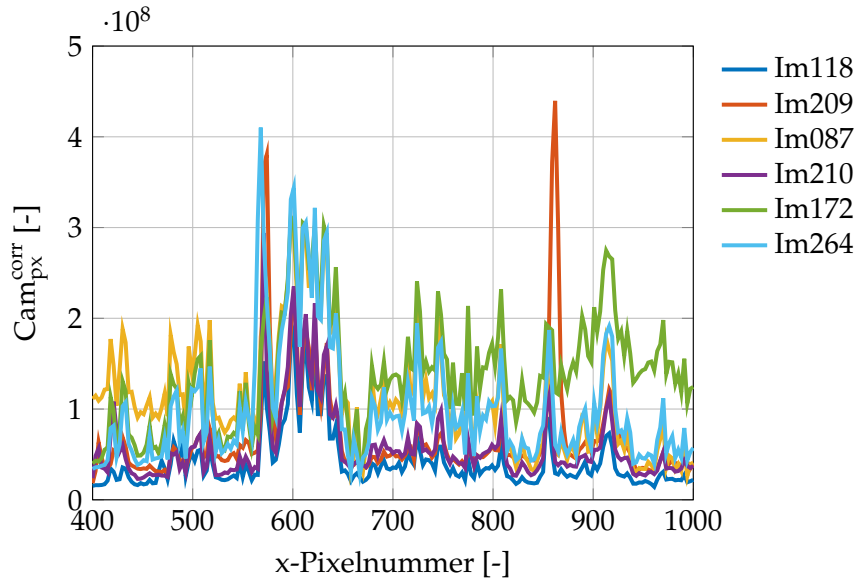


ABBILDUNG 6.9: RGB-Werte im Absorberreflex aufgetragen gegen die x-Koordinate der Pixel unter der roten Linie für unterschiedliche Bilder. Dabei werden in jedem Bild dieselbe Positionen ausgewertet (siehe rote Linie im Anhang B). Bei der Darstellung ist jeder Messpunkt eines Bildes mit dem entsprechenden Streufaktor $\Phi_{\text{px}}^{\text{scat}}$ korrigiert.

Der NRMSE in Tabelle 6.2 ist bei den Bildern Im087, Im172 und Im264 deutlich kleiner als derjenige der unkorrigierten RGB-Werte aus Tabelle 6.1. Diese Verbesserung ist auch in Abbildung 6.9 zu erkennen. Der NRMSE der Bilder Im118, Im209 und Im210 ist jedoch geringfügig größer als derjenige der unkorrigierten RGB-Werte aus Tabelle 6.1. Da diese Bilder aus einer ähnlichen Kameraposition aufgenommen wurden, sind die Helligkeitsbedingungen fast identisch. Aus diesem Grund ist nur eine geringe Korrektur nötig, welche durch den Streufaktor $\Phi_{\text{px}}^{\text{scat}}$ und damit durch die Streufunktion ungenau abgebildet wird. Es ist schon hier ersichtlich, dass die Übereinstimmung der Kurven, sehr stark von der Genauigkeit der Streufunktion abhängt.

TABELLE 6.2: NRMSE über die Differenz der RGB-Werte eines Bildes zu denjenigen im Bild Im118. Bei den entsprechenden Messpunkten wurde mit dem Streufaktor $\Phi_{\text{px}}^{\text{scat}}$ korrigiert.

	Im118	Im209	Im087	Im210	Im172	Im264
NRMSE - no corr	0	0,60	9,65	0,37	11,98	4,98
NRMSE - all corr	0	1,14	2,66	0,53	3,59	2,26

Nun wurden für die Errechnung der Streufunktion verschiedene Annahmen zur Partikelgrößenverteilung, zum Solarspektrum und zum Brechungsindex gemacht. Diese Annahmen wurden aufgrund von verschiedenen Quellen getroffen. Wird nun

aber als Beispiel nicht die Partikelgrößenverteilung nach Roth [39], sondern nach Hasan [21] angenommen, können nicht nur optische Verbesserungen, wie in Abbildung 6.10 ersichtlich, erzielt werden, auch der statistische NRMSE-Wert verbessert sich nochmals (siehe Tabelle 6.3).

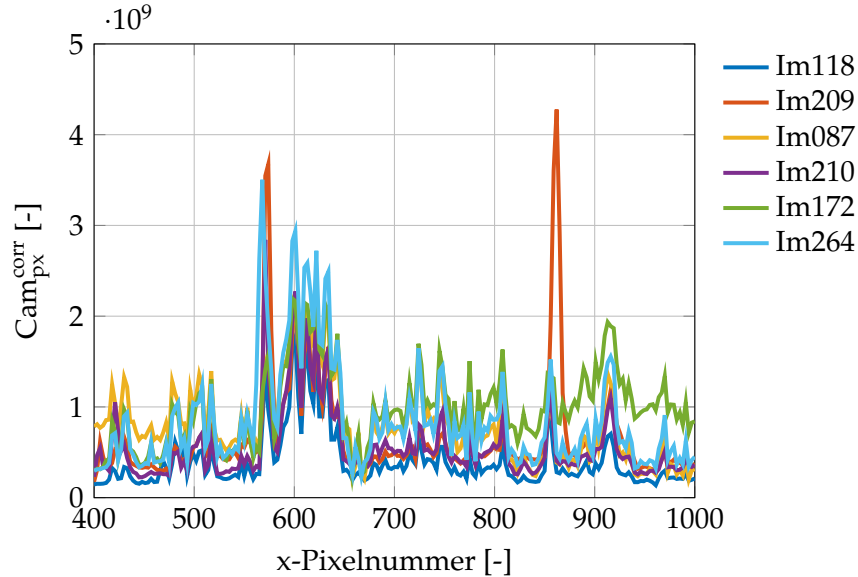


ABBILDUNG 6.10: RGB-Werte im Absorberreflex aufgetragen gegen die x-Koordinate der Pixel unter der roten Linie für unterschiedliche Bilder. Dabei wird in jedem Bild dieselbe Position ausgewertet (siehe rote Linie im Anhang B). Bei der Darstellung ist jeder Messpunkt eines Bildes mit dem entsprechenden Streufaktor Φ_{px}^{scat} , der mit der Partikelgrößenverteilung von Hasan [21] berechnet ist, korrigiert.

Die Abweichung der Bilder Im087, Im172 und Im264 wird durch die geänderte Streufunktion nochmals geringer. Bei den Bildern Im118, Im209 und Im210 steigt die Abweichung leicht an. Jedoch soll dieses Beispiel verdeutlichen, welche Auswirkungen die Änderung der Partikelgrößenverteilung auf die Streufunktion und damit auf den Streufaktor Φ_{px}^{scat} hat. Nicht nur die Partikelgrößenverteilung, sondern auch weitere Parameter wie das Solarspektrum oder der Brechungsindex können einen Einfluss auf das Ergebnis haben.

TABELLE 6.3: NRMSE über die Differenz der RGB-Werte eines Bildes zu denjenigen im Bild Im118. Bei den entsprechenden Messpunkten wurde mit dem Streufaktor $\Phi_{\text{px}}^{\text{scat}}$ korrigiert. Die erste Korrektur wurde mit der Partikelgrößenverteilung nach Roth [39] und die zweite Korrektur wurde mit der Partikelgrößenverteilung nach Hasan [21] berechnet.

	Im118	Im209	Im087	Im210	Im172	Im264
NRMSE - no corr	0	0,60	9,65	0,37	11,98	4,98
NRMSE - all corr roth	0	1,14	2,66	0,53	3,59	2,26
NRMSE - all corr hasan	0	1,17	1,72	0,55	2,38	1,87

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass über orts aufgelöste Informationen eines Bildes eine Aussage über die Verschmutzung eines Parabolrinnenspiegels getroffen werden kann. Über den linearen Zusammenhang zwischen der Reflektivität und dem RGB-Wert lässt sich die Verschmutzung des Spiegels bestimmen. Mit der Berechnung des Streufaktors $\Phi_{\text{px}}^{\text{scat}}$ ist es möglich, die Verschmutzung von unterschiedlichen Bildern vergleichbar zu machen. Erst durch den Streufaktor kann ein Drohnenflug mit Unterschiedlichen geometrischen Informationen (z.B. Positionen von Kamera, Spiegel, Sonne und Absorberrohr) ausgewertet werden. In Abbildung 6.10 kann nun über den Faktor $Cam_{\text{px}}^{\text{corr}}$ die Verschmutzung quantifiziert werden. Je größer der Wert ist, desto größer ist die Verschmutzung auf dem Spiegel. Durch den Streufaktor kann die Aussage über die Verschmutzung unabhängig von dem Bild und damit von den geometrischen Informationen getroffen werden. Dies ist in Abbildung 6.8 ohne den Streufaktor noch nicht möglich gewesen. Für die Genauigkeit der Aussage über die Verschmutzung ist maßgeblich die Strahldichteverteilung (Streufunktion – z.B. in Abbildung 6.1) verantwortlich. Je genauer diese Funktion bestimmt werden kann, umso besser können unterschiedliche Bilder verglichen werden.

Diskussion & Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, ein neuartiges Messverfahren zu entwickeln, welches orts aufgelöste Informationen eines Bildes nutzt, um Aussagen über den Verschmutzungsgrad des gesamten Solarfeldes eines Parabolrinnenkraftwerks abzuleiten. Dabei sollen Bilder eines unbemannten Luftfahrzeugs, ausgestattet mit einer hochauflösenden Kamera verwendet werden. Das Messprinzip basiert auf der Korrelation zwischen dem Verschmutzungsgrad und dem Kamerasignal. Beeinflusst wird diese Korrelation durch die Faktoren Partikelstreuung, Hintergrundspiegelung und diffuses Licht. Mithilfe der ausführlichen Herleitung der Mie-Streuung und der anschließenden Berechnung der Streuverteilungsfunktionen für unterschiedliche Parameter konnte die Streuung in die Kamera bestimmt werden. Schritt für Schritt wurde geometrisch die Streuung an Partikeln auf einem Parabolspiegel aufgebaut. Dabei sind wichtige Eigenschaften wie die Position der Drohne / Kamera, des Parabolspiegels und der Sonne als auch die Partikelgrößenverteilung und das Sonnenspektrum betrachtet und in die Berechnung eingebaut worden. Über die Herleitung kann nun die Strahlungsleistung berechnet werden, welche Aufgrund der Streuung an Schmutzpartikeln auf einem Spiegel in die Kamera gelangt. Auch das Hintergrundbild spielt eine wichtige Rolle, weshalb nur Bereiche ausgewertet werden, welche das Absorberrohr zeigen. Durch den dunklen Hintergrund können unerwünschte Einflüsse, wie die Himmelreflexion umgangen werden. Der Faktor diffuse Strahlung kann aufgrund des klaren Wetters während der Testmessung vorerst vernachlässigt werden. Damit es zu keinen Einflüssen durch kamerainterne Einstellungen kommt, ist die Erstellung eines JPEG-Bildes dargestellt. Um den linearen Zusammenhang zwischen Strahlungsleistung und den in einer RAW-Kameradatei gespeicherten RGB-Werten zu erhalten, wird die inverse Funktion der Gamma-Korrektur bestimmt und auf aufgenommene Bilder angewandt. Zusätzlich sollte die Temperatur des Weißabgleichs konstant für alle Bilder gehalten werden. Um die theoretischen Herleitungen zu überprüfen ist ein Experiment an einem freistehenden Kollektor durchgeführt worden. Während des Fluges (zehn minütige Spiralroute über dem Kollektor)

wurde der Kollektor aus verschiedenen Winkeln fotografiert. Nach dem UAV-Flug sind Referenzreflexionsmessungen an 35 Stellen gemacht worden, die über die untere Hälfte der Kollektorfläche verteilt sind. Die Verschmutzung an den Positionen der Referenzreflexionsmessungen können mit den RGB-Werten der aufgenommenen Bilder verglichen werden. Die grundlegende Idee, dass durch eine größere Anzahl an Partikeln auf dem Spiegel mehr Licht in die Kamera gestreut wird, konnte durch den linearen Zusammenhang von Reflexion und RGB-Wert bestätigt werden. Über die Korrekturfaktoren kann der RGB-Wert aus der Kamera so angepasst werden, dass verschiedene Bilder vergleichbar sind. Nach der Korrektur korreliert das Kamerasignal deutlich besser mit den Referenzmessungen als vor der Anwendung der Korrektur. Die entwickelte Methode zeigt bereits in diesem Anfangsstadium das Potenzial für eine flächendeckende Verschmutzungsmessung für Solarkraftwerke.

Bei der Berechnung der Streufunktion wurden verschiedene Annahmen gemacht, die für die weitere Entwicklung der Methode beachtet werden sollen. Die Partikelgrößenverteilung sollte mittels eines Mikroskops bestimmt werden, um diese genauer in die Berechnung mit einzubeziehen. Auch die AOD und AM sollten bei der nächsten Messung genau bestimmt bzw. das Solarspektrum sollte direkt gemessen werden. Der Brechungsindex des Partikelmaterials ist schwer zu bestimmen. Besonders der (mathematisch) imaginäre Anteil hat großen Einfluss auf die Streufunktion. Da die Bestimmung dieser Daten sehr zeitaufwändig ist und bei jedem Drohnenflug neu bestimmt werden muss, liegt der Ansatz nahe, die Streufunktion über den Vergleich von Helligkeitswerten derselben Spiegelstelle aus verschiedenen Kamerapositionen zu bestimmen. Durch eine bestimmte Flugroute können die Bilder so ausgewertet werden, dass die Streufunktion für alle Pixel der Spiegelflächen abgetastet wird. Dabei werden die Punkte im Reflex des Absorberrohres in Abhängigkeit des Blickwinkels ausgewertet (Video, Frames oder einzelne Bilder). Durch die Bilder und die verschiedenen Kamerapositionen (Winkel) kann eine Streufunktion bestimmt werden. Anhand dieser Streufunktion können alle weiteren Bilder von Kollektoren des Solarkraftwerks korrigiert werden, um die Verschmutzung zu erhalten. Diese experimentell gewonnene Streufunktion wird mit der Theorie überprüft. Ein weiterer Ansatz in Bezug auf die Streufunktion ist die Einschränkung auf bestimmte Kamerawinkel. Es wurde deutlich, dass bei extremen Winkeln ($< 20^\circ$) die Streufunktion erheblich ansteigt, was in der Praxis nur schwer zu kontrollieren ist. Aus diesem Grund wird eine Eingrenzung des zur Auswertung verwendeten Kamerawinkels zwischen 30° und 120° vorgeschlagen. Mit der jetzigen Methode werden nur Punkte untersucht, die sich innerhalb des Absorberreflexes befinden. Durch die Annahme, dass der dunkle Bereich einen geringen Effekt auf das RGB-Signal hat, ist die Berechnung natürlich sehr einfach. Dies sollte aber nochmals mittels eines geputzten Bereichs und einem verschmutzten Bereich im Absorberreflex überprüft werden. Über diesen Vergleich lässt sich der Einfluss des Hintergrunds bestimmen. Ein weiterer Nachteil des Absorberreflexes ist, dass keine Messung durchgeführt werden kann, während die Anlage im Betrieb ist (Fokus auf das Absorberrohr). In

diesem Fall müssen doch Spiegelregionen analysiert werden, die nicht das reflektierte Bild des HCE, sondern das des Himmels oder der Wolken zeigen. Der Hintergrundbeitrag wäre damit im Allgemeinen höher und inhomogener. Wenn diese Bereiche analysiert werden sollen, müsste der Hintergrund separat bestimmt werden, z.B. durch ein Himmelsluminanzmodell, wie in [33] beschrieben. Alternativ kann auch ein All-Sky-Imager wie in [32] verwendet werden, um die Helligkeit des Himmels direkt zu messen und in die Auswertalgorithmen aufzunehmen. Bei der beschriebenen Berechnung der Verschmutzung wird nur die Streuung der direkten solaren Bestrahlungsstärke DNI, die senkrecht auf den Spiegel trifft, beachtet. Die diffuse Bestrahlungsstärke DHI wird bisher, aufgrund der Wetterbedingungen zum Zeitpunkt des Experiments, völlig vernachlässigt. Auch die Streuung des diffusen Lichts könnte für das RGB-Signal der Kamera einen nicht unerheblichen Einfluss haben. Bei der radiometrischen Kamerakalibrierung sollte zusätzlich zur Gamma-Korrektur, Weißabgleich und Vignettierungseffekt auch die spektrale Empfindlichkeit berücksichtigt werden. Natürlich müssen bei einer Aufnahme mit einer anderen Kamera diese Messungen nochmals durchgeführt werden.

In Zukunft soll die Messmethode flächendeckende Verschmutzungsmessungen in Kraftwerken durchführen. Durch die Optimierung der Putzaktivitäten in den Solarkraftwerken soll sowohl die Effizienz des Kraftwerks erhöht als auch der Wasserbrauch eingegrenzt werden. Bei einer erfolgreichen Weiterentwicklung der Methode, soll die Verschmutzungsmessung auch auf Photovoltaik-Modulen Anwendung finden. Ein weiteres Ziel ist die Anwendung auf Gebäude, Gewächshäuser und größeren Anlagen. Die Vorteile der Drohne werden im urbanen Gebiet noch deutlicher.

Grundsätzlich lässt sich Zusammenfassen, dass die Arbeit ein Überblick über die radiometrischen und geometrischen Einflussfaktoren der luftgestützten, kamerabasierten Messmethode für den Verschmutzungsgrad von Solarfeldern gibt. In einer Messkampagne konnte die Machbarkeit der entwickelten Methode validiert und bestätigt werden. Über die Validierung des Experiments konnten zusätzliche Probleme der vorgestellten Messmethode aufgezeigt und diskutiert werden. Die zu erwartenden Messunsicherheiten, welche unter der Annahme einer ausreichend guten Kalibrieremethode durch den RMSD dargestellt werden, scheinen im Vergleich zum Referenz-Handreflektometer hoch zu sein, dessen Genauigkeiten typischerweise bei 1 % oder 2 % liegen. Diese Instrumente können jedoch nur einen sehr kleinen Teil der Spiegel in einem Solarfeld abdecken. Die vorgestellte Methode hat eine viel höhere Oberflächenabdeckung, die eventuelle Messungenauigkeiten ausgleichen kann.

Nützliche Identitäten

Die Identitäten sind bekannt und wurden von der Quelle [14] übernommen.

Nabla:

Der Nabla-Operator ist ein vielseitiger Differentialoperator, der auf skalaren oder Vektorfeldern anwendbar ist und skalare oder vektorielle Ergebnisse liefert.

$$\nabla \equiv i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \quad (\text{A.1})$$

Gradient:

Der Gradient wird auf einem skalaren Feld angewendet und erzeugt ein Vektorergebnis, das die Rate der räumlichen Änderung des Feldes an einem Punkt und die Richtung des stärksten Anstiegs von diesem Punkt an anzeigt.

$$\nabla \psi \equiv i \frac{\partial \psi}{\partial x} + j \frac{\partial \psi}{\partial y} + k \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (\text{A.2})$$

Divergenz:

Die Divergenz operiert mit einem Vektorfeld und liefert ein skalares Ergebnis, das die Tendenz des Feldes anzeigt, von einem Punkt weg zu fließen.

$$\nabla \circ A \equiv \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \quad (\text{A.3})$$

Curl:

Die Curl operiert auf einem Vektorfeld und erzeugt ein Vektorergebnis, das die Tendenz des Feldes anzeigt, um einen Punkt zu zirkulieren und die Richtung der Achse

mit der größten Zirkulation.

$$\nabla \times A \equiv \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) i + \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) j + \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) k \quad (\text{A.4})$$

In der Messkampagne verwendete Rohbilder

Aufnahmen des Kollektors aus dem Drohnenflug. Es sind vollständige entzerrte Bilder des Kollektors (Orthobild). Die RGB-Werte der rot markierten Linie werden ausgewertet.

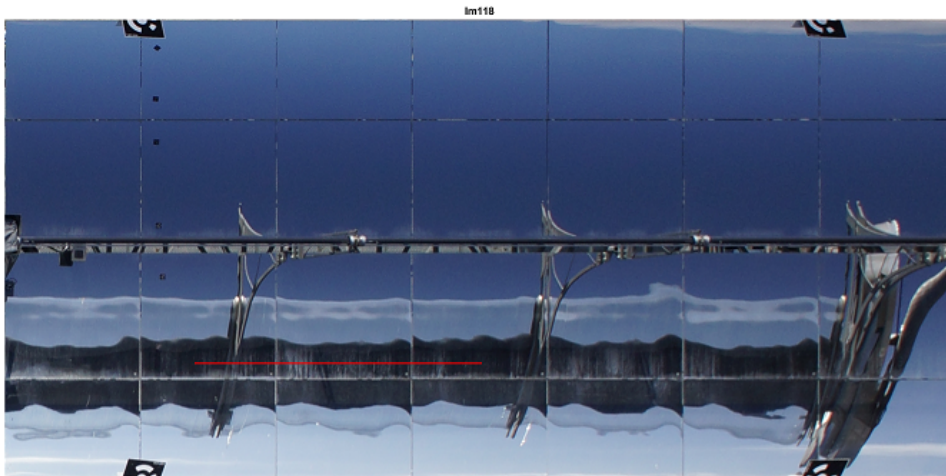


ABBILDUNG B.1: Bild Im118 aus dem Experiment

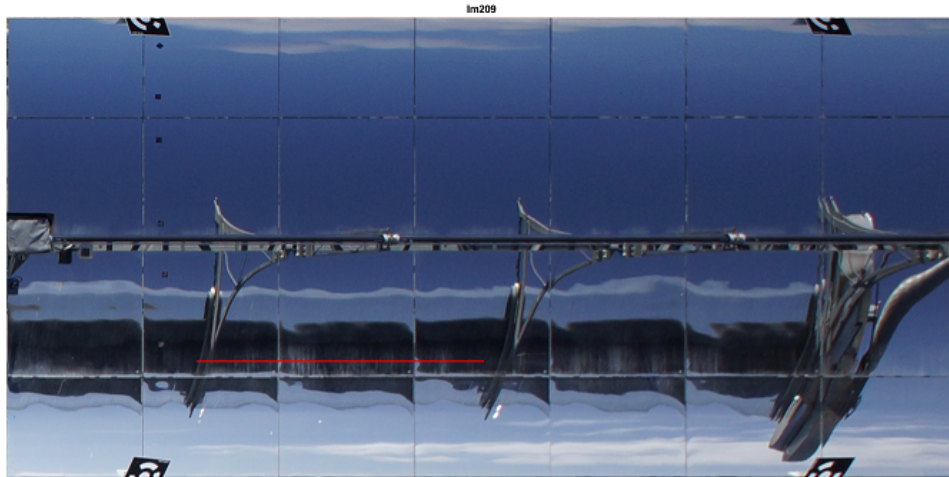


ABBILDUNG B.2: Bild Im209 aus dem Experiment

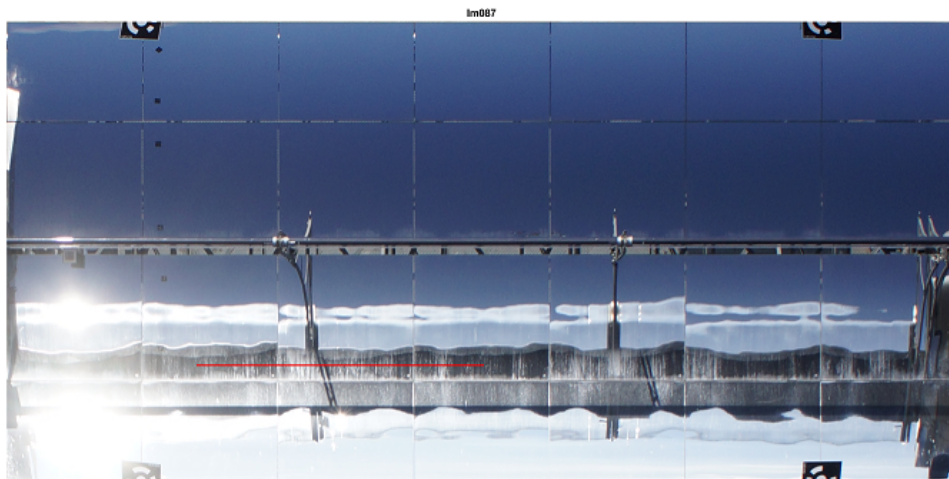


ABBILDUNG B.3: Bild Im087 aus dem Experiment

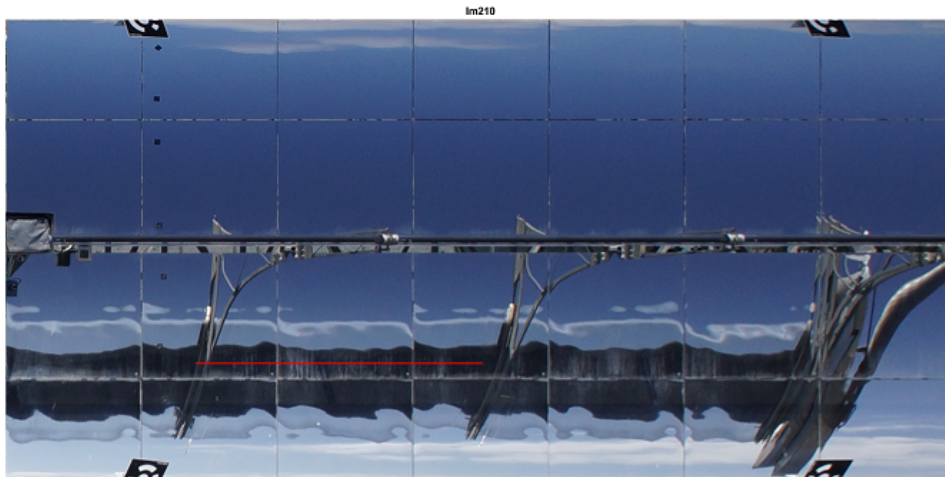


ABBILDUNG B.4: Bild Im210 aus dem Experiment

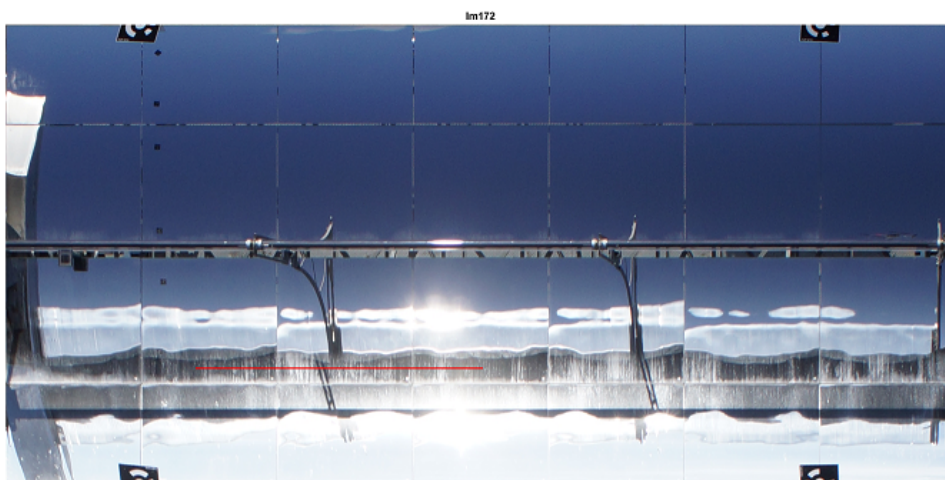


ABBILDUNG B.5: Bild Im172 aus dem Experiment

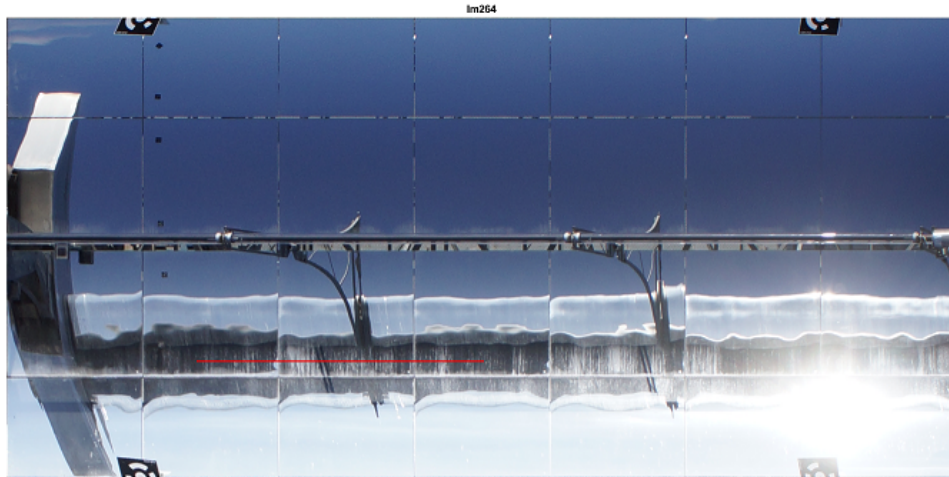


ABBILDUNG B.6: Bild Im264 aus dem Experiment

Literatur

- [1] M. Aghaei u. a. „Unmanned Aerial Vehicles in Photovoltaic Systems Monitoring Applications“. English. In: (2014). DOI: 10.4229/EUPVSEC20142014-5BV.1.45. URL: <https://search.datacite.org/works/10.4229/EUPVSEC20142014-5BV.1.45>.
- [2] ASTM. *G173 Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface*. English. Nov. 2012. DOI: 10.1520/G0173-03R12. URL: <http://www.astm.org/Standards/G173>.
- [3] Stefan Bartzsch. „Microbeam Radiation Therapy – physical and biological aspects of a new cancer therapy and development of a treatment planning system“. English. Diss. 2014. DOI: 10.11588/heidok.00017714. URL: <https://search.datacite.org/works/10.11588/heidok.00017714>.
- [4] Gregor Bern u. a. „FREDA - An automated field reflectance and degradation assessment system for central receiver systems“. In: *AIP Conference Proceedings* 2033.1 (Nov. 2018). DOI: 10.1063/1.5067229. URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.5067229>.
- [5] Sourav Bhattacharjee. „In relation to the following article "DLS and zeta potential - What they are and what they are not?"*Journal of Controlled Release*, 2016, 235, 337-351“. English. In: *Journal of controlled release : official journal of the Controlled Release Society* 238 (Sep. 2016), S. 311–312. DOI: 10.1016/j.jconrel.2016.07.002. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27397489>.
- [6] S. A. Biryukov. „Degradation of optical properties of solar collectors due to the ambient dust deposition as a function of particle size“. English. In: *Journal of Aerosol Science* 27 (1996), S38. DOI: 10.1016/0021-8502(96)00091-2. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0021850296000912>.
- [7] Craig F. Bohren und Donald R. Huffman. *Absorption and scattering of light by small particles*. 1. print. New York [u.a.]: Wiley, 1983. ISBN: 047105772X.
- [8] Georg Brakmann u. a. „construction of the ISCC kuraymat“. In: *SolarPace* (2009).
- [9] David R. Bull. *Communicating Pictures*. English. First edition. GB: Academic Press, 2014. ISBN: 0124059066. URL: [https://ebookcentral.proquest.com/lib/\[SITE_ID\]/detail.action?docID=1745753](https://ebookcentral.proquest.com/lib/[SITE_ID]/detail.action?docID=1745753).
- [10] DLR. *DLR-Innovation QFly erhält SolarPACES Technology Award*. English. 2018. URL: https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2018/4/20181008_qfly-solarpaces-technology-award.html.

- [11] Aránzazu Fernández-García u. a. „Equipment and methods for measuring reflectance of concentrating solar reflector materials“. English. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 167 (Aug. 2017), S. 28–52. DOI: 10.1016/j.solmat.2017.03.036. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024817301514>.
- [12] Jesús Fernández-Reche. „Reflectance measurement in solar tower heliostats fields“. English. In: *Solar Energy* 80.7 (2006), S. 779–786. DOI: 10.1016/j.solener.2005.06.006. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X0500232X>.
- [13] Benjamin Figgis u. a. „Review of PV soiling particle mechanics in desert environments“. English. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 76 (Sep. 2017), S. 872–881. DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.100. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117304355>.
- [14] Daniel A. Fleisch. *A student's guide to Maxwell's equations*. 1. publ. Cambridge [u.a.]: Cambridge University Press, 2008. ISBN: 9780521701471. URL: <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0803/2007037901-d.html>.
- [15] Sheldon K. Friedlander. *Smoke, dust, and haze*. 2. ed. New York [u.a.]: Oxford Univ. Press, 2000. ISBN: 0195129997.
- [16] Michael Gostein u. a. „Mars Soiling SensorTM“. In: *2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)(A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC)*. IEEE. 2018, S. 3417–3420.
- [17] C. Grana u. a. „Veiling Luminance estimation on FPGA-based embedded smart camera“. English. In: *IEEE*, Juni 2012, S. 334–339. DOI: 10.1109/IVS.2012.6232154. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6232154>.
- [18] Z. Guan u. a. „Dust characterisation for solar collector deposition and cleaning in a concentrating solar thermal power plant“. In: *Heat Exchanger Fouling and Cleaning*. Dublin, Ireland: International Conference on Heat Exchanger Fouling und Cleaning, Juni 2015, S. 301–307.
- [19] Christian Gueymard. *SMARTS2, A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and performance assessment*. Dez. 1995.
- [20] *Guide to meteorological instruments and methods of observation*. 5. ed. Bd. 8. Geneva: World Meteorological Organization, 1983.
- [21] Ahmad Y. Al-Hasan. „A new correlation for direct beam solar radiation received by photovoltaic panel with sand dust accumulated on its surface“. English. In: *Solar Energy* 63.5 (1998), S. 323–333. DOI: 10.1016/S0038-092X(98)00060-7. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X98000607>.

- [22] Anna Heimsath u. a. „Automated monitoring of soiling with AVUS instrument for improved solar site assessment“. In: *AIP Conference Proceedings* 2033.1 (Nov. 2018). DOI: [10.1063/1.5067193](https://doi.org/10.1063/1.5067193). URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.5067193>.
- [23] Peter Heller u. a. „KONTAS – A Rotary Test Bench for Standardized Qualification of Parabolic Trough Components“. English. In: *SolarPACES* (2011).
- [24] H C van de Hulst. *Light scattering by small particles*. New York: Wiley, 1957, S. 470.
- [25] Milton Kerker. *The scattering of light*. Bd. 16. New York [u.a.]: Academic Press, 1969. ISBN: 9780124045507.
- [26] M Korevaar, J Mes und X van Mechelen. „Measuring the Sun the components of Solar Radiation, traceability of measurements, and PV panel soiling“. In: *Optics for Solar Energy*. Optical Society of America. 2017, RTh2B–1.
- [27] P. Kuhn u. a. „Shadow camera system for the generation of solar irradiance maps“. English. In: *Solar Energy* 157 (Nov. 2017), S. 157–170. DOI: [10.1016/j.solener.2017.05.074](https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.074). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X17304814>.
- [28] Christian Kwisanga. „SQUID geomagnetic signal analysis and modelling of Schumann Resonances in the earth-ionosphere cavity“. Diss. März 2016.
- [29] Stephanie Meyen und Others And. *Parameters and method to evaluate the solar reflectance properties of reflector materials for concentrating solar power technology - Official SolarPACES reflectance guideline version 2.5*. English. Juni 2013.
- [30] Kevin L. Moss. *Camera Raw with Photoshop For Dummies*. English. 1. Aufl. US: For Dummies, 2006. ISBN: 9780471774822. URL: http://ebooks.ciando.com/book/index.cfm/bok_id/494191.
- [31] Daryl Ronald Myers. *Solar radiation: practical modeling for renewable energy applications*. English. CRC Press, März 2013. ISBN: 9781466502949. URL: <http://www.vlebooks.com/vleweb/product/openreader?id=none&isbn=9781466503274&uid=none>.
- [32] Bijan Nouri u. a. „Nowcasting of DNI maps for the solar field based on voxel carving and individual 3D cloud objects from all sky images“. In: *AIP Conference Proceedings* 2033.1 (Nov. 2018). DOI: [10.1063/1.5067196](https://doi.org/10.1063/1.5067196). URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.5067196>.
- [33] R. Perez, R. Seals und J. Michalsky. „All-weather model for sky luminance distribution—Preliminary configuration and validation“. English. In: *Solar Energy* 50.3 (1993), S. 235–245. DOI: [10.1016/0038-092X\(93\)90017-I](https://doi.org/10.1016/0038-092X(93)90017-I). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X9390017I>.

- [34] Andreas Petzold u. a. „Saharan dust absorption and refractive index from aircraft-based observations during SAMUM 2006“. English. In: *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 61.1 (Jan. 2009), S. 118–130. DOI: 10.1111/j.1600-0889.2008.00383.x. URL: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1111/j.1600-0889.2008.00383.x>.
- [35] Charles A. Poynton. *Digital video and HDTV*. Amsterdam [u.a.]: Morgan Kaufmann, 2003. ISBN: 1558607927.
- [36] Christoph Prahll u. a. „Airborne characterization of the Andasol 3 solar field“. In: *AIP Conference Proceedings* 2033.1 (Nov. 2018). DOI: 10.1063/1.5067029. URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.5067029>.
- [37] Christoph Prahll u. a. „Airborne shape measurement of parabolic trough collector fields“. English. In: *Solar Energy* 91 (Mai 2013), S. 68–78. DOI: 10.1016/j.solener.2013.01.012. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X13000273>.
- [38] Adriana Rocha-Lima u. a. „A detailed characterization of the Saharan dust collected during the Fennec campaign in 2011: in situ ground-based and laboratory measurements“. English. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 18.2 (Jan. 2018), S. 1023–1043. DOI: 10.5194/acp-18-1023-2018. URL: <https://search.proquest.com/docview/1991088149>.
- [39] E. P. Roth und A. J. Anaya. „The Effect of Natural Soiling and Cleaning on the Size Distribution of Particles Deposited on Glass Mirrors“. English. In: *Journal of Solar Energy Engineering* 102.4 (1980), S. 248. DOI: 10.1115/1.3266188.
- [40] E. P. Roth und R. B. Pettit. *Effect of soiling on solar mirrors and techniques used to maintain high reflectivity*. English. Techn. Ber. Juni 1980. DOI: 10.2172/5249717. URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/5249717>.
- [41] J. Schäfer, S. -C Lee und A. Kienle. „Calculation of the near fields for the scattering of electromagnetic waves by multiple infinite cylinders at perpendicular incidence“. English. In: *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 113.16 (Nov. 2012), S. 2113–2123. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2012.05.019. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022407312002786>.
- [42] Jan-Patrick Schäfer. „Implementierung und Anwendung analytischer und numerischer Verfahren zur Lösung der Maxwellgleichungen für die Untersuchung der Lichtausbreitung in biologischem Gewebe“. German. In: (2011). DOI: 10.18725/OPARU-1914. URL: <https://search.datacite.org/works/10.18725/OPARU-1914>.
- [43] Jan-Patrick Schäfer. *MatScat*. English. 2012. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/36831-matscat>.

- [44] Jeff Schewe und Bruce Fraser. *Real World Camera Raw with Adobe Photoshop CS5*. English. First. Peachpit Press, Juli 2010. ISBN: 9780321713094. URL: <https://proquestcombo.safaribooksonline.com/9780131385061>.
- [45] Devices & Services. *portable specular reflectometer 15r-usb*. 2019. URL: <https://www.devicesandservices.com/15R%5C%20Spec%5C%20Sheet.pdf>.
- [46] Scott A. Prahl Steven L. Jacques. *Definition and units of scattering coefficient*. English. 1998. URL: <https://omlc.org/classroom/ece532/class3/musdefinition.html>.
- [47] Richard Szeliski. *Computer Vision : Algorithms and Applications*. English. London: Springer, Sep. 2010. ISBN: 9781848829343. URL: [https://ebookcentral.proquest.com/lib/\[SITE_ID\]/detail.action?docID=973471](https://ebookcentral.proquest.com/lib/[SITE_ID]/detail.action?docID=973471).
- [48] Felix Terhag u. a. „Optimization of cleaning strategies based on ANN algorithms assessing the benefit of soiling rate forecasts“. In: *AIP Conference Proceedings* 2126.1 (2019). DOI: 10.1063/1.5117764. URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.5117764>.
- [49] Frank Träger. *Springer Handbook of Lasers and Optics*. English. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. ISBN: 9783642194085. DOI: 10.1007/978-3-642-19409-2. URL: http://ebooks.ciando.com/book/index.cfm/bok_id/321011.
- [50] Muhammed Unluturk, Ahmet Afsin Kulaksiz und Ali Unluturk. „Image Processing-based Assessment of Dust Accumulation on Photovoltaic Modules“. English. In: *Energy and Communication Conference* (Juni 2019).
- [51] M. Vivar u. a. „Effect of soiling in CPV systems“. English. In: *Solar Energy* 84.7 (2010), S. 1327–1335. DOI: 10.1016/j.solener.2010.03.031. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X1000157X>.
- [52] R. Wagner u. a. „Complex refractive indices of Saharan dust samples at visible and near UV wavelengths: a laboratory study“. English. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 12.5 (März 2012), S. 2491–2512. DOI: 10.5194/acp-12-2491-2012. URL: <https://search.proquest.com/docview/935658991>.
- [53] Fei Wang und Albert Theuwissen. „Linearity analysis of a CMOS image sensor“. English. In: *Electronic Imaging* 2017.11 (Jan. 2017), S. 84–90. DOI: 10.2352/ISSN.2470-1173.2017.11.IMSE-191.
- [54] F. Wolfertstetter u. a. „Monitoring of Mirror and Sensor Soiling with TraCS for Improved Quality of Ground based Irradiance Measurements“. English. In: *Energy Procedia* 49 (2014), S. 2422–2432. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.03.257. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214007115>.
- [55] Fabian Wolfertstetter. „Auswirkung von Verschmutzung auf konzentrierende solarthermische Kraftwerke“. Diss. Jan. 2016.

- [56] Fabian Wolfertstetter u. a. *A Novel Method for Automatic Real-Time Monitoring of Mirror Soiling Rates*. English. Jan. 2012. URL: <https://www.openaire.eu/search?q=&Search=>.
- [57] Fabian Wolfertstetter u. a. „Integration of Soiling-Rate Measurements and Cleaning Strategies in Yield Analysis of Parabolic Trough Plants“. English. In: *Journal of Solar Energy Engineering* 140.4 (2018), S. 41008. DOI: [10.1115/1.4039631](https://doi.org/10.1115/1.4039631).
- [58] Wai Kean Yap, Galet Roy und Kheng Cher Yeo. „Quantitative Analysis of Dust and Soiling on Solar PV Panels in the Tropics Utilizing Image-Processing Methods“. In: *Solar Research Conference*. 2015.
- [59] Jose I. Zapata, Cameron Dally und Greg Burgess. „Estimation of average mirror reflectivity using digital photographs and specular reflectometer measurements“. In: *Asia Pacific Solar Research Conference (APSRC)*. Brisbane, Dez. 2015.
- [60] Guangdong Zhu, David Kearney und Mark Mehos. „On characterization and measurement of average solar field mirror reflectance in utility-scale concentrating solar power plants“. English. In: *Solar Energy* 99. January 2014 (Jan. 2014), S. 185–202. DOI: [10.1016/j.solener.2013.11.009](https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.11.009). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X13004817>.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst habe und alle benutzten Quellen angegeben sind. Alle Ausführungen, die fremden Quellen wörtlich oder sinngemäß entnommen wurden, sind kenntlich gemacht. Die Arbeit war in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht Bestandteil einer Studien- oder Prüfungsleistung.

Ulm, 4. März 2020

.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift